

激光雷达外参数的自动标定

龚子恺¹, 席燕辉¹, 沈大勇^{2*}¹长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410114;²国防科技大学系统工程学院, 湖南 长沙 410003

摘要 在工程应用中使用三维激光雷达的基础是对激光雷达的外参数进行标定,而对激光雷达外参标定通常都需要其他传感器的数据进行联合标定,且标定方法复杂,过程耗时较长。对此,提出一种简便的自动标定算法。首先利用 RANSAC 算法拟出多个平面,并通过相邻点法向量的夹角进行平面的二次筛选得到其平面方程,再根据平面方程得到平面间的交点坐标,使用反对称矩阵构建旋转矩阵,进一步利用交点坐标在雷达坐标系与世界坐标系下的不同求得近似转换关系,最后利用最小二乘思想对近似矩阵进行优化,得到较为准确的旋转位移矩阵。所提算法可以在特征点、角点云缺失的情况下,通过平面方程拟合出较为精确的角点。仿真结果表明,该算法是可行的。

关键词 三维激光雷达; 外参标定; RANSAC 算法; 反对称矩阵; 最小二乘

中图分类号 TN958.98

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP230605

Automatic Calibration of LiDAR External Parameters

Gong Zikai¹, Xi Yanhui¹, Shen Dayong^{2*}

¹School of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, Hunan, China;

²College of Systems Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410003, Hunan, China

Abstract The basis of using 3D LiDAR in engineering application is to calibrate the external parameters of LiDAR, and the external parameters of LiDAR usually need to calibrate the data of other sensors jointly, and the calibration method is complicated and the process is long. In this paper, a simple automatic calibration algorithm is proposed. The algorithm first uses RANSAC algorithm to draw up a number of planes, and through the angle of the normal vector of the adjacent points for the secondary screening plane equation, then according to the plane equation to get the coordinates of the intersection point between the planes, using the antisymmetric matrix to construct the rotation matrix, further using the intersection point coordinates in the radar coordinate system and the world coordinate system under the difference, to obtain the approximate transformation relationship. Finally, the approximation matrix is optimized by the least square method, and a more accurate rotation displacement matrix is obtained. In the absence of feature points and corner clouds, the proposed algorithm can be used to fit more accurate corner points by plane equation. The simulation results show that the proposed calibration algorithm is feasible.

Key words 3D LiDAR; external parameter calibration; RANSAC algorithm; antisymmetric matrix; least square

1 引言

激光雷达是一种能够迅速并且准确获得物体三维信息的高分辨率成像技术。正是由于这种科学技术的出现,人们在空间信息的提取方面获得了技术支持^[1]。激光扫描技术与常规的测量相比具有比较以下优点: 1) 激光扫描技术中大多数都是非接触式的探测技术,受周围环境的干扰也相对小; 2) 测量效率也比常规要

高上许多,采集速度比传统要快很多,与传统的单次采样不同而是自动连续多次交替进行,循环采集; 3) 采用多次回波技术,具有一定的穿透力^[2]。激光雷达有着测距速度快、精度高、获取信息直观的特性,在很多方面获得了越来越多的应用。例如在海洋区域测量、空间建模与测绘、航天工程还有汽车无人驾驶领域中均可见到激光雷达的踪迹,在物流机器人、扫地机器人等移动机器人领域中也常常会用到激光雷达,由此可见

收稿日期: 2023-02-09; 修回日期: 2023-03-02; 录用日期: 2023-04-03; 网络首发日期: 2023-04-13

通信作者: *dayong.shen@nudt.edu.cn

其功能的强大^[3-12]。

但是在很多的应用场景中,三维激光雷达安装的位置一般与所需要使用的世界坐标系位置不同^[13-14]。于是,在测量之前就必须对激光雷达进行位置和角度上的校正,而外参数的标定就是通过计算得到这些校正后的参数,得到激光雷达与世界坐标系间的相对变换关系,即旋转平移矩阵的过程。国内外的学者为了得到此旋转平移矩阵,提出了多种方法,大多数都是通过使用各种各样的标定物,例如:三棱锥、四棱锥、圆形标定板、棋盘格标定板等,加上拟合算法、聚类算法等不同的算法来完成激光雷达的标定。其中,陈贵宾等^[12]采用的分步标定算法,首先通过粒子群优化算法(PSO)对俯仰、翻滚角以及纵向位移进行标定,再通过聚类标定杆的中心得到聚类中心的直线拟合来完成对剩下一部分参数的标定。杨逸文等^[15]针对车载激光雷达设计了一个简易的标定与验证方法,通过在平坦地面放置标定物、激光水准仪以及在车首车尾放置铅锤,使水准仪径向激光束穿过铅锤从而进行标定。王春梅等^[16]制作 3 块平面标定板,以 321 坐标系建立法为基础,拟合 3 块标定平面,通过计算坐标系原点的方法进行激光雷达的外参标定。李树青等^[17]通过使用云台加二维激光雷达的方法来实现三维激光雷达的功能,标定时将一块水平标定板放置在激光雷达正上方,测量时使云台旋转一个角度,基于得到的结果与初始测量的结果来完成激光雷达的外参标定。Beltrán 等^[18]通过制作圆形标定板,并对圆心进行拟合,通过雷达扫描拟合到的圆心数据与现实中的数据进行点对的配对并解算出位移旋转矩阵。Memon 等^[19]使用了两个 2D 激光雷达进行正交组合来完成 3D 点云地图的构建。Szaj 等^[20]设计的电动轮椅中采用了二位激光雷达和 2D 旋转扫描机构来确保采集到轮椅周围的 3D 图像。这两位学者都通过二维雷达来构建三维雷

达,再与真值解算出旋转位移矩阵。

上述研究中,大部分学者在进行标定前,往往需要制作特定的标定板,并且都是通过直接使用提取特征点的算法从激光雷达扫描到的点云数据中直接提取特征点,而激光雷达扫描时通常会伴有有点云数据缺损的情况,此时提取到的特征点可能并不准确。除了对单激光雷达标定的研究,大多数情况下都会选择激光雷达与其他传感器数据进行联合标定^[21-22],因为在没有其他传感器的情况下,世界坐标系下能获取到的点的真值信息少之又少。

针对上述问题,本文拟合多平面得到平面的方程,从而得到激光雷达坐标系下的平面交点坐标,并在多个位置取不同交点数据与世界坐标系下测量得到的真值形成同名点对,从而构建方程组,利用反对称矩阵构建旋转矩阵并通过解反对称矩阵中的元素从而求得旋转矩阵,来达到外参标定的目的。此方法在进行单个激光雷达标定时也能使用,并且只需要在世界坐标系中采集到 3 个平面的交点,例如立方体纸箱的角点、车辆车厢里的角点等。且通过平面方程进行计算时,即使点云数据中存在特征点缺失的问题也能拟合出较为准确的特征点。

2 算法原理

首先通过对标定物使用 RANSAC 算法^[10]拟合平面,再对平面点云的每一个点通过点法向量提取角点或者特征点来比较同一点在两个坐标系下坐标的转换关系来完成对单个激光雷达与世界坐标系的外参标定。在标定过程中,激光雷达通常至少要能拟合 3 个面,这样才可以通过 3 个面的方程得到它们的交点^[5],并使其作为特征点,然后将标定物在不改变其姿态的条件下,平移到多个不同的位置得到此特征点在坐标系下的不同位置信息,用于建立约束方程,从而得到旋转位移矩阵,如图 1 所示。

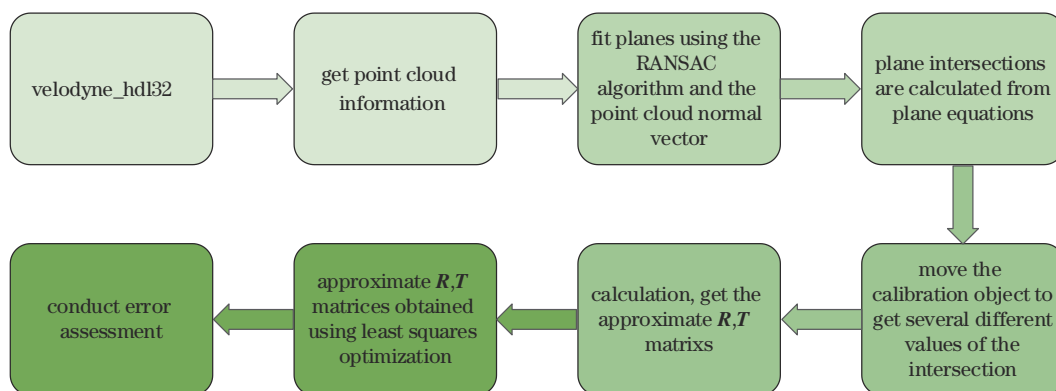


图 1 标定流程图

Fig. 1 Calibration process

2.1 使用 RANSAC 算法与点云法向量得到平面参数

RANSAC 算法是一种在一组含有异常点的数据

中正确寻找、估计最优数学模型的迭代算法。首先随机选取一组点,通过选取的这组点获得一个初始的平

面模型,计算点云中其他点到此平面模型的距离值,小于阈值的点称为内点,大于阈值的点则是外点。计算保存所有符合当前模型的内点。之后重复之前的步骤得到新的平面模型,通过计算内点与模型的错误率,即内点在点云中的占比来评估新的模型与上一次的模型,来得到更可信的平面模型。通过一定次数的迭代来得到最后的最优模型。

文献[11]在使用传统RANSAC算法之前先计算了点云的法向量对点云进行了粗提取。所提方法在RANSAC算法拟合平面之后,对该平面点云再次计算点云法向量,进行二次筛选,得到更可信的平面模型。具体步骤如下:

- 1) 使用RANSAC算法进行初步的平面拟合;
- 2) 在步骤1)得到的点集中取初始点;
- 3) 在初始点的邻域中搜索,取离初始点最近的几点,并计算协方差矩阵;
- 4) 使用奇异值分解(SVD)得到法向量;
- 5) 取除初始点外另一点,重复步骤4)和5);
- 6) 计算与上一点法向量的夹角,大于阈值就舍弃该点,小于阈值则保留;
- 7) 重复步骤5)和6),得到所有符合要求的平面点云,达到二次筛选的目的,结束。

图2和图3分别为点云法向量图和法向量计算流程图。

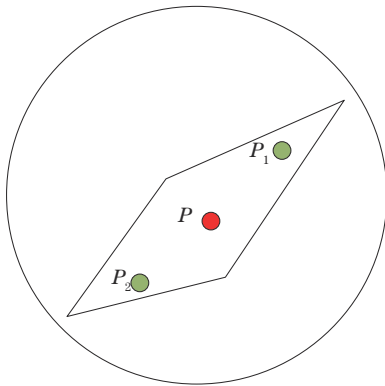


图2 点云法向量图

Fig. 2 Normal vector diagram of point cloud

2.2 求解近似旋转矩阵

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}^A = \lambda \left(\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} + \mathbf{R}_0 \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}^B \right), \quad (1)$$

式中: λ 是比例参数; \mathbf{R}_0 是旋转矩阵; Δ 是平移向量;A、B分别是两个坐标系中的坐标。A坐标系为世界坐标系,B坐标系为激光雷达坐标系。比例参数 λ ,又称为尺度因子,用来衡量两个坐标系之间的尺度关系,可以表示为

$$\lambda = \frac{|p_1^A p_2^A|}{|P_1^B P_2^B|} = \frac{|p_2^A p_3^A|}{|P_2^B P_3^B|} = \frac{|p_3^A p_1^A|}{|P_3^B P_1^B|}, \quad (2)$$

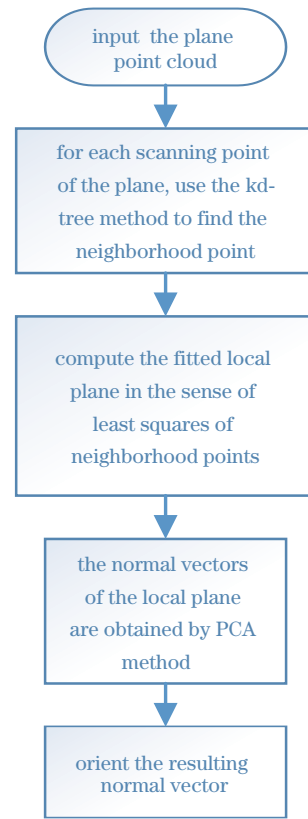


图3 法向量计算流程图

Fig. 3 Flow chart of normal vector calculation

式中: $|P_1^A P_2^A|$ 是两点在A坐标系中的距离; $|P_1^B P_2^B|$ 是两点在B坐标系中的距离。然后利用反对称矩阵 \mathbf{S} 来构造旋转矩阵 \mathbf{R}_0 。

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} 0 & -c & -b \\ c & 0 & -a \\ b & a & 0 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

$$\mathbf{R}_0 = \frac{\mathbf{I} + \mathbf{S}}{\mathbf{I} - \mathbf{S}}, \quad (4)$$

式中: \mathbf{I} 是单位矩阵。此处 \mathbf{R}_0 因为只有 a 、 b 、 c 这3个变量,所以解出 a 、 b 、 c 即可确定旋转矩阵 \mathbf{R}_0 。把 $P_1 P_2$ 两点代入式(1)可以消除 Δx 、 Δy 、 Δz 。

$$\begin{bmatrix} P_{1X}^A - P_{2X}^A \\ P_{1Y}^A - P_{2Y}^A \\ P_{1Z}^A - P_{2Z}^A \end{bmatrix} = \lambda \mathbf{R}_0 \begin{bmatrix} P_{1X}^B - P_{2X}^B \\ P_{1Y}^B - P_{2Y}^B \\ P_{1Z}^B - P_{2Z}^B \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中: $P_{1X}^A = P_1$ 点在A坐标系下的X坐标。将式(4)代入式(5),可得:

$$\begin{bmatrix} X_{12}^A + cY_{12}^A + bZ_{12}^A \\ -cX_{12}^A + Y_{12}^A + aZ_{12}^A \\ -bX_{12}^A - aY_{12}^A + Z_{12}^A \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} X_{12}^B - cY_{12}^B - bZ_{12}^B \\ cX_{12}^B + Y_{12}^B - aZ_{12}^B \\ bX_{12}^B + aY_{12}^B + Z_{12}^B \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中: $X_{12}^A = P_{1X}^A - P_{2X}^A$ 。整理式(6)得到:

$$\begin{bmatrix} X_{12}^A - \lambda X_{12}^B \\ Y_{12}^A - \lambda Y_{12}^B \\ Z_{12}^A - \lambda Z_{12}^B \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} -c(\lambda Y_{12}^B + Y_{12}^A) - b(\lambda Z_{12}^B + Z_{12}^A) \\ c(\lambda X_{12}^B + X_{12}^A) - a(\lambda Z_{12}^B + Z_{12}^A) \\ b(\lambda X_{12}^B + X_{12}^A) - b(\lambda Y_{12}^B + Y_{12}^A) \end{bmatrix}. \quad (7)$$

同理将 P_1P_3 点代入方程又会得到不同的另一个方程组,将两个方程组联立可得:

$$\begin{bmatrix} X_{12}^A - \lambda X_{12}^B \\ Y_{12}^A - \lambda Y_{12}^B \\ Z_{13}^A - \lambda Z_{13}^B \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} -b(\lambda Z_{12}^B + Z_{12}^A) - c(\lambda Y_{12}^B + Y_{12}^A) \\ -a(\lambda Z_{12}^B + Z_{12}^A) + c(\lambda X_{12}^B + X_{12}^A) \\ a(\lambda Y_{13}^B + Y_{13}^A) + b(\lambda X_{13}^B + X_{13}^A) \end{bmatrix}. \quad (8)$$

联立可以解出 a, b, c 这 3 个参数进而可以求得近似旋转矩阵 \mathbf{R}_0 , 将 \mathbf{R}_0 矩阵代回式(1)就可以得到近似位移矩阵 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ ^[6-7]。

2.3 使用最小二乘进行结果优化

得到近似旋转矩阵和近似位移矩阵之后,可以得到激光雷达坐标系到世界坐标系的近似转换关系。为了得到更加精确的转换关系,本文先将近似转换后得到的坐标,使用第 2.2 节的方法多迭代几次后,得到更加精确的结果,使转换之后的特征点更逼近真值^[8]。

将雷达点云特征点集经过近似转换后的特征点集设为 $\mathbf{P} = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$, 而将世界坐标系下的特征点集设为 $\mathbf{Q} = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}$, 为了寻找到一个新的转换关系使点集 \mathbf{P} 去逼近点集 \mathbf{Q} , 使得转换后的点与真值点间的距离最小, 因此可以建立一个目标函数:

$$F(\mathbf{R}, \mathbf{T}) = \operatorname{argmin} \sum_{i=1}^n \|(\mathbf{R}p_i + \mathbf{T}) - q_i\|^2, \quad (9)$$

使 $\frac{\partial F}{\partial \mathbf{T}}$ 可得到:

$$\mathbf{0} = \sum_{i=1}^n 2(\mathbf{R}p_i + \mathbf{T} - q_i) = 2n\mathbf{T} + 2\mathbf{R}\left(\sum_{i=1}^n p_i\right) - 2\left(\sum_{i=1}^n q_i\right), \quad (10)$$

所以 \mathbf{T} 矩阵可以表示为

$$\mathbf{T} = \frac{\sum_{i=1}^n q_i - \mathbf{R} \sum_{i=1}^n p_i}{n}, \quad (11)$$

将 \mathbf{T} 矩阵代入式(9)可以得到:

$$\begin{aligned} F(\mathbf{R}, \mathbf{T}) &= \operatorname{argmin} \sum_{i=1}^n \|(\mathbf{R}p_i + \mathbf{T}) - q_i\|^2 = \\ &= \operatorname{argmin} \sum_{i=1}^n \left\| \left(\mathbf{R}p_i - \frac{\mathbf{R} \sum_{i=1}^n p_i}{n} \right) - \left(q_i - \frac{\sum_{i=1}^n q_i}{n} \right) \right\|^2 = \\ &= \operatorname{argmin} \sum_{i=1}^n \| \mathbf{R}x_i - y_i \|^2, \end{aligned} \quad (12)$$

式中: $x_i = p_i - \frac{\sum_{i=1}^n p_i}{n}, y_i = q_i - \frac{\sum_{i=1}^n q_i}{n}$ 。将式(12)展开,有

$$\begin{aligned} &\operatorname{argmin} \sum_{i=1}^n \| \mathbf{R}x_i - y_i \|^2 = \\ &= \operatorname{argmin} \sum_{i=1}^n (\mathbf{R}x_i - y_i)^\top (\mathbf{R}x_i - y_i) = \\ &= \operatorname{argmin} \sum_{i=1}^n (x_i^\top \mathbf{R}^\top \mathbf{R}x_i - y_i^\top \mathbf{R}x_i - x_i^\top \mathbf{R}^\top y_i - y_i^\top y_i). \end{aligned} \quad (13)$$

又因为 \mathbf{R} 为旋转矩阵, 旋转矩阵都是正交阵, 所以 $\mathbf{R}^\top \mathbf{R} = \mathbf{I}$, 且 $y_i^\top \mathbf{R}x_i, x_i^\top \mathbf{R}^\top y_i$ 两项为标量且值相同, 所以式(13)又能表示为

$$\operatorname{argmin} \sum_{i=1}^n \| \mathbf{R}x_i - y_i \|^2 = \operatorname{argmin} \sum_{i=1}^n (x_i^\top \mathbf{R}^\top \mathbf{R}x_i - y_i^\top \mathbf{R}x_i - x_i^\top \mathbf{R}^\top y_i - y_i^\top y_i). \quad (14)$$

所以只需求 $\operatorname{argmin} \sum_{i=1}^n (-2y_i^\top \mathbf{R}x_i)$ 即可。令 $X =$

$\{x_1, x_2, \dots, x_n\}, Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ 。求得 X, Y 点集的协方差矩阵 \mathbf{S} , 再将 \mathbf{S} 矩阵使用 SCD 就能得到旋转矩阵 \mathbf{R} , 再将 \mathbf{R} 矩阵代入式(11)中就能得到矩阵 \mathbf{T} 。此步骤相当于在原标定基础上做了二次标定, 最终得到旋转矩阵 \mathbf{R}_1 与位移矩阵 \mathbf{T}_0 。

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_A &= \lambda \mathbf{R} \left(\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} + \mathbf{R}_0 \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_B \right) + \mathbf{T}, \\ \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_A &= \lambda \mathbf{R} \mathbf{R}_0 \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_B + \lambda \mathbf{R} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + \mathbf{T}, \\ \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_A &= \mathbf{R}_1 \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_B + \mathbf{T}_0, \end{aligned} \quad (15)$$

式中: $\lambda \mathbf{R} \mathbf{R}_0$ 为 $\mathbf{R}_1; \lambda \mathbf{R} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} + \mathbf{T}$ 为 \mathbf{T}_0 。

3 实验及结果

3.1 立方体仿真数据实验分析

仿真实验选用 Gazebo 仿真平台, 三维雷达选择了 velodyne_hdl32 多线雷达的模型, 编程语言使用的是 C++, 点云处理使用 pcl 库, 使用 eigen 库进行矩阵运算, 整个代码搭建在 ros 平台上, 使用话题订阅来接受 velodyne_32 的点云信息, 特征点是通过一个立方体三面交点得到的。Gazebo 仿真环境如图 4 所示。

首先先将雷达姿态设置为: $\{\Delta x, \Delta y, \Delta z, \theta_{yaw}, \theta_{roll}, \theta_{pitch}\} = \{0, 0, 1.5, 0, 28.6479, 0\}$, 将此设为姿态一。两个坐标系的相对位置关系如图 5 所示。雷达坐标系在世界坐标系的上方, 其中, $o-xyz$ 坐标系为世界坐标系, $o'-x'y'z'$ 坐标系为雷达坐标系。 $\Delta\theta_{pitch}$ 为绕 x 轴旋转的角度, $\Delta\theta_{roll}$ 为绕 y 轴旋转的角度, $\Delta\theta_{yaw}$ 为绕 z 轴旋转的角度。仿真实验的第一步就是对收集到的点

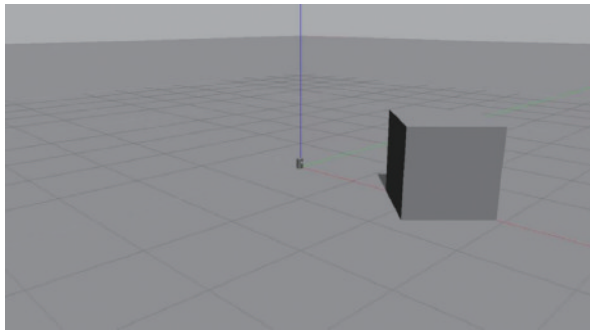


图 4 Gazebo 仿真环境
Fig. 4 Gazebo simulation environment

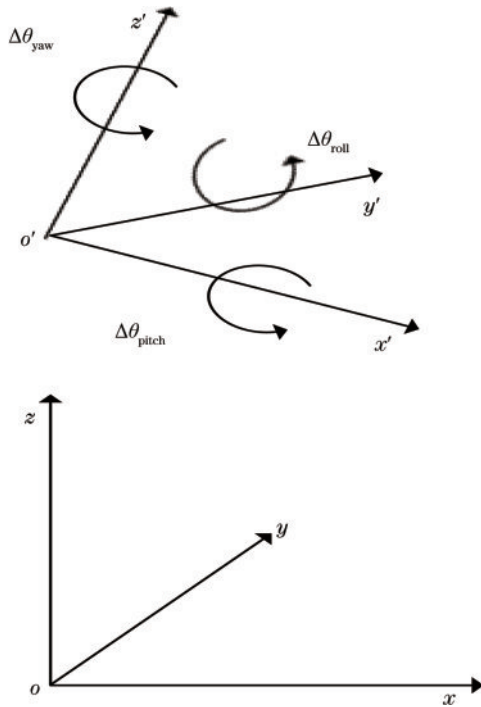


图 5 坐标系的相对位置关系
Fig. 5 The relative position of the coordinate system

云使用 RANSAC 算法提取立方体的 3 个平面,为了使拟合平面更加精准,需要在使用 RANSAC 算法之前

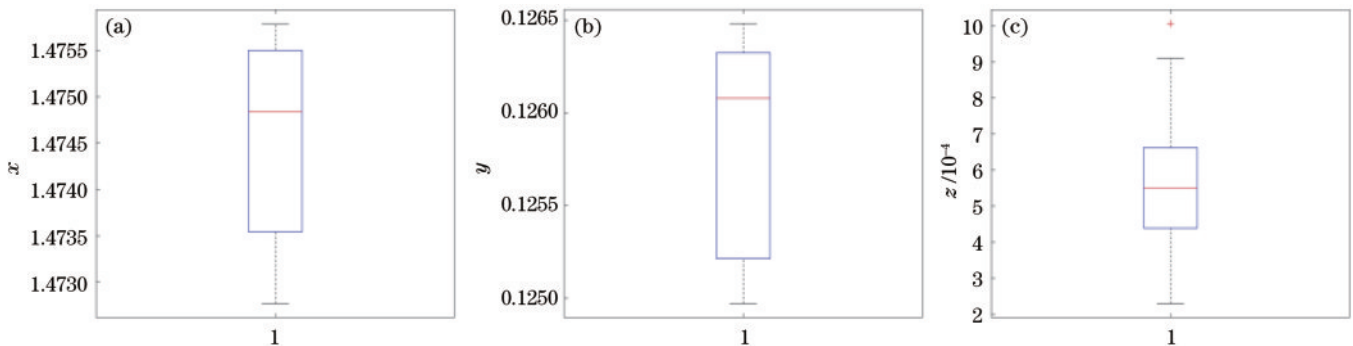


图 7 拟合角点的箱型图。(a) x 坐标; (b) y 坐标; (c) z 坐标
Fig. 7 Box plot of corner data. (a) x coordinate; (b) y coordinate; (c) z coordinate

除了 RANSAC 算法,如今也有很多拟合角点的方法被提出,其中,比较常用的是使用传统 Harris 拟

加入滤波器,滤掉除了感兴趣区域之外的点云,再通过点云法向量的比较去除掉一些杂点,筛选后的点云数量如图 6 所示。

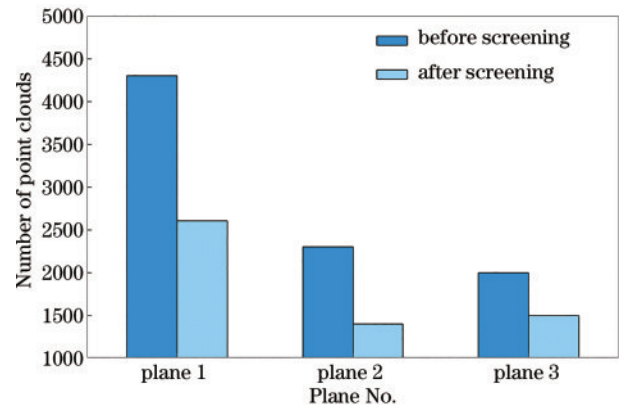


图 6 通过法向量筛选后的点云数量
Fig. 6 The number of point clouds screened by the normal vector

通过前面的步骤得到 3 个平面方程后就能得到交点坐标。通过移动立方体能够获得几组不同位置的交点对,最后通过数值算法求得近似旋转移矩阵。

因为标定算法是数值方法,因此计算得到的交点坐标越精准,计算出来的近似矩阵越精准,而交点坐标由 3 个平面方程得到,所以算法的系统误差主要在于 RANSAC 算法拟合平面的精准度。通过多次实验得到 RANSAC 中设置点到平面的阈值为 0.01 时拟合出来的平面最为准确,即点到拟合平面的距离超过 0.01 m 则该点不属于此平面。为了减小异常点带来的误差影响,本文对同一位置的交点拟合结果选取 20 组数据取均值,并使用箱型图的方法排除掉偏差较大的拟合交点。图 7 是其中一组拟合角点数据的箱型图。20 组数据中有 1 组异常数据,剩下其他数据都为正常数据,舍弃离群点之后再对剩下的数据求均值。标定物的原始点云图如图 8 所示,拟合出的 3 个平面的点云图如图 9 所示,标定结果如表 1 所示,标定误差如表 2 所示。

合角点的方法^[9-10]。Harris 方法先体素化整个点云空间,再从体素中建立局部坐标系 $O-XYZ$, Z 轴为

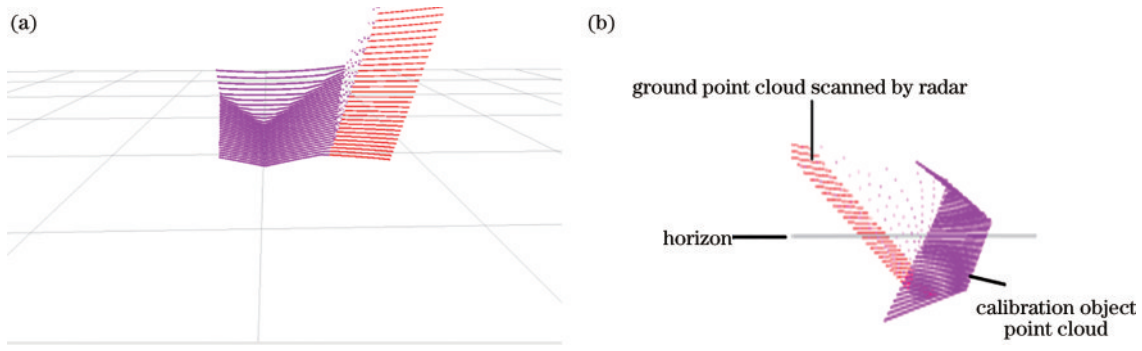


图 8 原始点云图。(a)正面图;(b)侧面图

Fig. 8 Original point cloud. (a) Front view; (b) side view

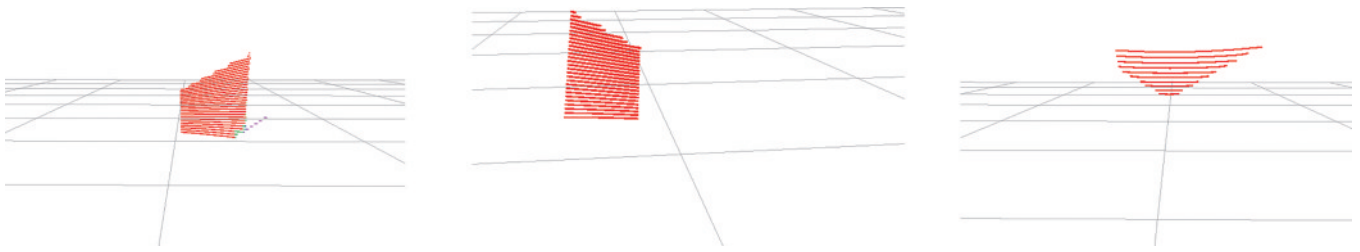


图 9 拟合平面

Fig. 9 Fitting plane

法向量方向,通过体素内的点云个数求解点云的梯度计算其海森矩阵 M ,令 $R = |M| - k \cdot \text{tr}^2(M)$,最后对 R 采用非极大值抑制处理,将大于阈值的极大值点作为角点。在仿真实验中也使用了此方法来代替 RANSAC 算法并与所提方法进行比较。从表 1 和表 2 中可以看出, Harris 方法效果并不

理想。

将雷达姿态设置改成 $\{\Delta x, \Delta y, \Delta z, \theta_{yaw}, \theta_{roll}, \theta_{pitch}\} = \{0, 0, 1.5, 0, 22.9183, 0\}$,表 3 是所提方法的标定误差。

3.2 不垂直平面数据实验分析

所提算法根据平面方程进行计算,为了验证算法在

表 1 姿态 1 的 Gazebo 仿真的标定结果

Table 1 Calibration results of Gazebo simulation for attitude 1

| The method of calculating corner points | $\theta_{yaw} / (^\circ)$ | $\theta_{roll} / (^\circ)$ | $\theta_{pitch} / (^\circ)$ | x / m | y / m | z / m |
|---|---------------------------|----------------------------|-----------------------------|---------|---------------------------|-----------|
| RANSAC | -0.003 | 26.9759 | 0.028 | 0.0616 | -0.008000 | -1.570000 |
| Harris | -0.020 | 26.7023 | 1.456 | 0.0600 | -0.001770 | -1.780000 |
| This article (not optimized) | -0.001 | 28.6338 | 0.064 | 0.0168 | -0.000911 | -1.588630 |
| This article (after optimized) | -0.001 | 28.5579 | 0.044 | 0.0016 | -4.85778×10^{-6} | -1.502084 |

表 2 姿态 1 的标定误差(取绝对值)

Table 2 Calibration error of attitude 1 (take absolute value)

| The method of calculating corner points | $\Delta\theta_{yaw} / (^\circ)$ | $\Delta\theta_{roll} / (^\circ)$ | $\Delta\theta_{pitch} / (^\circ)$ | $\Delta x / m$ | $\Delta y / m$ | $\Delta z / m$ |
|---|---------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|----------------|---------------------------|----------------|
| RANSAC | 0.003 | 1.672 | 0.028 | 0.0617 | 0.008000 | 0.070000 |
| Harris | 0.020 | 1.946 | 1.456 | 0.0600 | 0.001770 | 0.280000 |
| This article (not optimized) | 0.001 | 0.014 | 0.064 | 0.0168 | 0.000911 | 0.088630 |
| This article (after optimized) | -0.001 | 0.090 | 0.044 | 0.0016 | -4.85778×10^{-6} | 0.002084 |

表 3 姿态 2 标定误差(取绝对值)

Table 3 Calibration error of attitude 2 (take absolute value)

| The method of calculating corner points | $\Delta\theta_{yaw} / (^\circ)$ | $\Delta\theta_{roll} / (^\circ)$ | $\Delta\theta_{pitch} / (^\circ)$ | $\Delta x / m$ | $\Delta y / m$ | $\Delta z / m$ |
|---|---------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|----------------|----------------|----------------|
| This article (not optimized) | 0.022195 | 0.295 | 0.702000 | 0.08881 | 0.0102056 | 0.092043 |
| This article (after optimized) | 0.002149 | 0.020 | 0.066043 | 0.00032 | 0.0004232 | 0.001755 |

平面不互相垂直,但是有交点的情况下的性能,在第 3.1 节的仿真实验环境下将立方体改为箭头模型,来验证算法的可行性。

其中,雷达的位姿为 $\{\Delta x, \Delta y, \Delta z, \theta_{yaw}, \theta_{roll}, \theta_{pitch}\} = \{0, 2, 0, 5.7296, 0, 5.7296\}$,多次移动箭头模型位置形成特征点组,并使用所提算法进行标定,并同时使用 Harris 拟合角点法与单独使用 RANSAC 两种方法对相同模型进行标定的结果进行比较。图 10 和图 11 分别为标定前后雷达点云,表 4 和表 5 为不同方法标定结果和标定误差。

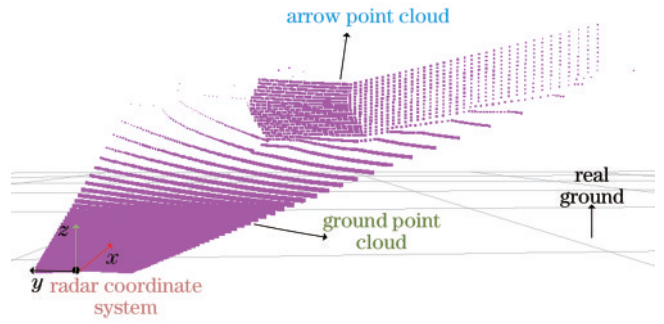


图 10 标定前雷达点云

Fig. 10 Radar point cloud before calibration

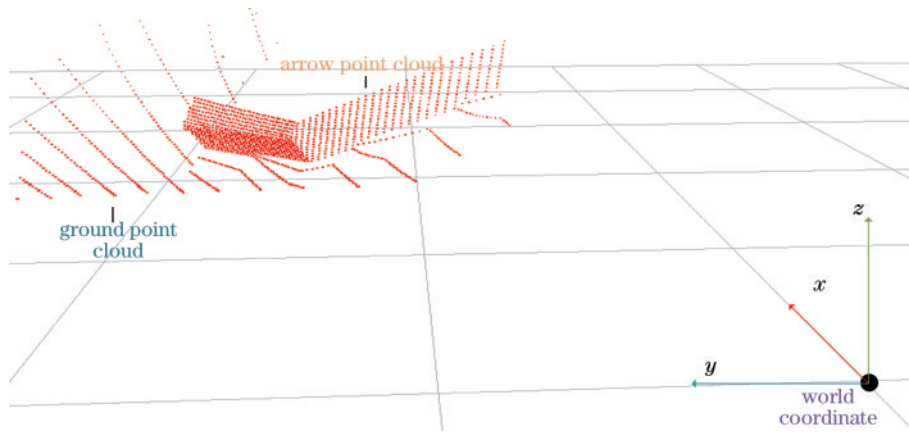


图 11 标定后点云

Fig. 11 Point cloud after calibration

表 4 Gazebo 仿真的标定结果

Table 4 Calibration results of Gazebo simulation

| The method of calculating corner points | $\Delta\theta_{yaw} / (^\circ)$ | $\Delta\theta_{roll} / (^\circ)$ | $\Delta\theta_{pitch} / (^\circ)$ | $\Delta x / m$ | $\Delta y / m$ | $\Delta z / m$ |
|---|---------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|----------------|----------------|----------------|
| RANSAC | 6.6922 | 0.8642 | 6.7870 | 0.04 | 2.08089 | -0.0167 |
| Harris | 3.542 | 3.734 | 7.6853 | 0.0296175 | 2.075231 | -0.0192522 |
| This article (not optimized) | 6.032 | 0.519 | 5.85625 | 0.035 | 2.0720 | -0.04478 |
| This article (after optimized) | 5.79515 | 0.0913 | 5.6750 | 0.027 | 2.0305 | 0.0035 |

表 5 标定误差(取绝对值)

Table 5 Calibration error (take absolute value)

| The method of calculating corner points | $\Delta\theta_{yaw} / (^\circ)$ | $\Delta\theta_{roll} / (^\circ)$ | $\Delta\theta_{pitch} / (^\circ)$ | $\Delta x / m$ | $\Delta y / m$ | $\Delta z / m$ |
|---|---------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|----------------|----------------|----------------|
| RANSAC | 0.9626 | 0.8642 | 1.0574 | 0.04 | 0.08089 | 0.0167 |
| Harris | 2.1876 | 3.734 | 1.9557 | 0.0296175 | 0.075231 | -0.0192522 |
| This article (not optimized) | 0.3024 | 0.519 | 0.12665 | 0.035 | 0.0720 | -0.04478 |
| This article (after optimized) | 0.0655 | 0.0913 | 0.0546 | 0.027 | 0.0305 | 0.0035 |

3.3 实际数据实验分析

为了验证算法在实际数据中的可行性,在较为平坦的办公室内摆放一个立方体形状的纸箱,以纸箱为标定对象进行标定实验。实验环境如图 12 所示。实验采用的激光雷达是 Sick 公司的 LMS511 室外型激光扫描器,通过使用 2D 雷达搭配旋转平台构建三维雷

达,其水平扫描角度为 190° ,平台旋转角度可达 140° 。

如图 12 所示,将激光雷达放在桌面上,并用书将其垫高,使其产生一个角度来模拟工程状况中因安装产生角度差的情况。

如图 13 所示,纸箱紧贴着墙面,以纸箱的角点作为特征点,通过在水平方向的移动,得到几组不同的同



图 12 实验环境

Fig. 12 Experimental environment



图 13 标定物示意图

Fig. 13 Calibration objects

名点。根据数据可求得旋转平移矩阵,并对原始点云进行转换。

图 14 为初始点云与转换后点云的叠加图,是对图 12 的实验环境进行扫描得到的点云数据,方框所标注的位置为标定物大致的位置,通过图 14 可以观察到两个点云间存在一定的角度差。由于雷达的测量中心并不好测量,因此精确的位移误差并不方便得到,本实

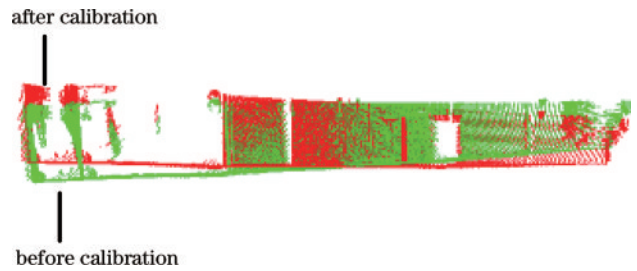


图 14 点云效果图

Fig. 14 Point cloud contrast

验的实验结果通过对经过标定转换后的纸箱点云进行平面分割得到 3 个平面,并分别计算其与理想地平面和墙面的夹角来验证。分割出的 3 个平面如图 15 所示,标定结果如表 6 所示。

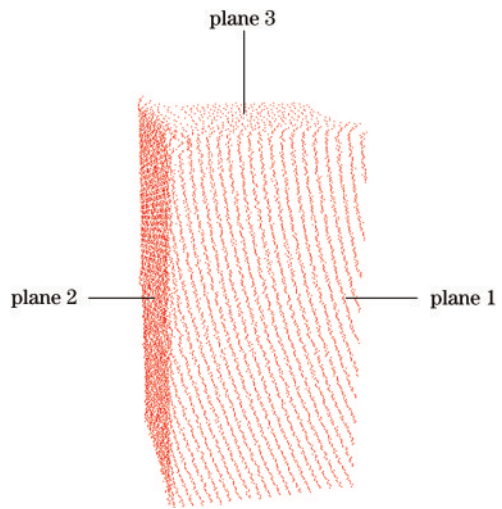


图 15 箱体点云分割

Fig. 15 Box point cloud segmentation

表 6 标定结果

Table 6 Calibration results

| Plane No. | Ideal plane normal vector | Calibrated point cloud plane normal vector | Angle / (°) |
|-----------|---------------------------|--|-------------|
| Plane 1 | (0,0,1) | (-0.0164003, -0.0093987, 0.999821) | 0.02 |
| Plane 2 | (1,0,0) | (0.999905, -0.0137898, -0.000619757) | 0.0127 |
| Plane 3 | (0,1,0) | (0.00956443, 0.999605, -0.0264231) | 0.0184 |

从表 6 可以得出,标定后的旋转误差为分别为 0.02°,0.0127°和 0.0184°,均小于 0.1°,标定效果良好,可以满足工程使用需求。

4 结 论

对于单个雷达的外参标定问题,提出一种结合了 RANSAC 算法与使用反对称矩阵构建旋转矩阵的数值算法的标定算法。通过 RANSAC 算法与点云法向量拟合平面取平面间的交点作为特征点,再通过数值算法得到旋转平移的近似矩阵,最后利用最小二乘的思想对近似矩阵进行优化使其更接近真实的旋转位移矩阵。通过仿真验证了该算法的可行性,且该算法不

需要其他传感器的数据传入,也不需要定制专门的标定板,并且在特征点缺失的情况下也能拟合出较为精确的角点,在许多应用场景中如工厂、车载雷达等,都能应用到该算法。所提算法应用于相对简单的环境中,适用于能够获得世界坐标系下少量特征点的值,雷达位置等其他参数不易测量的应用场景。而对特征点拟合的准确性是决定标定算法精度的重要因素,未来的研究方向是改进对角点或者特征点的拟合算法,从而提高其精度。

参 考 文 献

[1] 靳望. 三维激光扫描数据的应用[J]. 数码设计(上), 2019

- (3): 146.
Jin W. Application of three-dimensional laser scanning data[J]. Peak Data Science, 2019(3): 146.
- [2] 贺健. 三维激光扫描测量系统的应用及解析[J]. 中国新技术新产品, 2019(21): 15-16.
He J. Application and analysis of three-dimensional laser scanning measurement system[J]. New Technology & New Products of China, 2019(21): 15-16.
- [3] 项志宇. 快速三维扫描激光雷达的设计及其系统标定[J]. 浙江大学学报(工学版), 2006, 40(12): 2130-2133.
Xiang Z Y. Fast 3D scanning laser radar system design and calibration[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2006, 40(12): 2130-2133.
- [4] 蒙庆华, 林辉, 王革, 等. 激光雷达工作原理及发展现状[J]. 现代制造技术与装备, 2019(10): 155-157.
Meng Q H, Lin H, Wang G, et al. Laser radar operating principle and development status[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2019(10): 155-157.
- [5] 王国利, 王晏民, 郭明. 基于平面特征的箱型钢结构点云角点自动提取[J]. 工程勘察, 2016, 44(10): 43-46.
Wang G L, Wang Y M, Guo M. Automatic extraction of corner points from box-steel-structure point clouds based on plane features[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2016, 44(10): 43-46.
- [6] 石银涛, 董阿忠, 赵钢. 基于罗德里格矩阵的水域与陆域点云配准研究[J]. 人民长江, 2020, 51(10): 205-209.
Shi Y T, Dong A Z, Zhao G. Study on point cloud registration of water area and land area based on Rodrigue Matrix[J]. Yangtze River, 2020, 51(10): 205-209.
- [7] 韩梦泽, 李克昭. 基于罗德里格矩阵的空间坐标转换[J]. 测绘工程, 2016, 25(4): 25-27.
Han M Z, Li K Z. Spatial coordinate transformation based on Rodrigues matrix[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2016, 25(4): 25-27.
- [8] Sorkine-Hornung O, Rabinovich M. Least-squares rigid motion using SVD[EB/OL]. [2022-12-23]. https://igl.ethz.ch/projects/ARAP/svd_rot.pdf.
- [9] 朱思聪, 周德龙. 角点检测技术综述[J]. 计算机系统应用, 2020, 29(1): 22-28.
Zhu S C, Zhou D L. Review on image corner detection[J]. Computer Systems & Applications, 2020, 29(1): 22-28.
- [10] Wang Z C, Li R, Shao Z H, et al. Adaptive Harris corner detection algorithm based on iterative threshold[J]. Modern Physics Letters B, 2017, 31(15): 1750181.
- [11] 刘美菊, 王旭东, 李凌燕, 等. 改进的RANSAC算法在三维点云配准中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(10): 101104.
Liu M J, Wang X D, Li L Y, et al. Improved random sampling consistency algorithm employed in three-dimensional point cloud registration[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(10): 101104.
- [12] 陈贵宾, 高振海, 何磊. 车载三维激光雷达外参数的分步自动标定算法[J]. 中国激光, 2017, 44(10): 1010004.
Chen G B, Gao Z H, He L. Step-by-step automatic calibration algorithm for exterior parameters of 3D lidar mounted on vehicle[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(10): 1010004.
- [13] 程金龙, 冯莹, 曹毓, 等. 车载激光雷达外参数的标定方法[J]. 光电工程, 2013, 40(12): 89-94.
Cheng J L, Feng Y, Cao Y, et al. Extrinsic calibration method for multiple lidars mounted on mobile vehicle[J]. Opto-Electronic Engineering, 2013, 40(12): 89-94.
- [14] 虞静, 黄陆君, 唐海龙, 等. 面向自动装车的来车检测和规划系统[J]. 应用激光, 2022, 42(1): 91-100.
Yu J, Huang L J, Tang H L, et al. Incoming vehicle detection and planning system for automatic loading[J]. Applied Laser, 2022, 42(1): 91-100.
- [15] 杨逸文, 贺越生, 王春香, 等. 一种面向固态激光雷达的简易标定与验证方法[J]. 上海交通大学学报, 2021, 55(S2): 98-102, 109.
Yang Y W, He Y S, Wang C X, et al. A simple calibration and verification method for solid-state lidar[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2021, 55(S2): 98-102, 109.
- [16] 王春梅, 黄凤山, 薛泽. 装车机器人激光雷达测量系统及其标定方法[J]. 光电工程, 2019, 46(7): 129-136.
Wang C M, Huang F S, Xue Z. LiDAR measurement system and the calibration method of loading robot[J]. Opto-Electronic Engineering, 2019, 46(7): 129-136.
- [17] 李树青, 邢鑫龙, 林靖宇. 一种三维激光雷达系统标定方法[J]. 激光与红外, 2022, 52(2): 182-187.
Li S Q, Xing X L, Lin J Y. A calibration method for 3D lidar system[J]. Laser & Infrared, 2022, 52(2): 182-187.
- [18] Beltrán J, Guindel C, de la Escalera A, et al. Automatic extrinsic calibration method for LiDAR and camera sensor setups[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(10): 17677-17689.
- [19] Memon E A A, Jafri S R U N, Ali S M U. A rover team based 3D map building using low cost 2D laser scanners[J]. IEEE Access, 2021, 10: 1790-1801.
- [20] Szaj W, Fudali P, Wojnarowska W, et al. Mechatronic anti-collision system for electric wheelchairs based on 2D LiDAR laser scan[J]. Sensors, 2021, 21(24): 8461.
- [21] 覃兴胜, 李晓欢, 唐欣, 等. 基于标定板关键点的激光雷达与相机外参标定方法[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(4): 0428001.
Qin X S, Li X H, Tang X, et al. Extrinsic calibration method of lidar and camera based on key points of calibration board[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(4): 0428001.
- [22] 宋文松, 张宗华, 高楠, 等. 基于强度信息的激光雷达和相机空间位姿标定方法[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(2): 0215003.
Song W S, Zhang Z H, Gao N, et al. Spatial pose calibration method for lidar and camera based on intensity information[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(2): 0215003.