

文章编号:1001-5078(2020)01-0030-07

· 激光应用技术 ·

一种多线激光雷达与 GNSS/INS 系统标定方法

叶珏磊¹, 周志峰¹, 王立端², 庞正雅¹

(1. 上海工程技术大学机械与汽车工程学院, 上海 201620; 2. 上海司南卫星导航技术股份有限公司, 上海 201801)

摘要:对于车载激光雷达(LiDAR), 惯导系统(INS)与卫星导航(GNSS)的组合导航定位系统, 传感器数据融合之前需要对传感器安装位置进行标定。针对以上目标本文提出了一种基于分步迭代法与KD树优化的DBSCAN算法寻求最优安置参数的方法。对初始安置参数进行粗略测量后通过分步迭代法迭代初始参数附近的值, 并基于KD树优化的密度聚类算法(DBSCAN)将转换到唯一坐标系下的相邻帧点云集位置重合度进行评价, 择优得到最准确的安置参数。实验使用最近迭代点算法(ICP)对不同分步步长的标定参数结果进行对比, 实验结果表明安置参数在缩小步长的情况下精度会得到略微提高; 本文采用的方法相比初始估计外参提高了标定精度。

关键词: 三维激光雷达; 三维坐标系转换; ICP; DBSCAN; 分步迭代法

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2020.01.006

A calibration method of lidar and GNSS/INS system

YE Jue-lei¹, ZHOU Zhi-feng¹, WANG Li-duan², PANG Zheng-ya¹

(1. College of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China; 2. Shanghai Compass Satellite Navigation Technology Co., Shanghai 201801, China)

Abstract: For Light Detection And Ranging (LiDAR), Inertial Navigation (INS) and Global Navigation satellites system (GNSS) integrated navigation and positioning systems, the sensor mounting location needs to be calibrated before the sensor data is fused. Aiming at the above objectives, this paper proposes a method based on fragmented iterative method and KD tree optimization DBSCAN algorithm to find the optimal placement parameters. After the initial measurement parameters are roughly measured, the values near the initial parameters are iterated by the fragmented iterative method, and the DBSCAN algorithm based on the KD tree optimization is used to evaluate the coincidence degree of the adjacent frame points in the unique coordinate system, and the best accurate placement parameters is obtained. The experiment uses Iterative Closest Point (ICP) algorithm to compare the calibration parameters of different stepsizes. The experimental results show that the accuracy of the placement parameters is slightly improved in the case of reducing the step size. The method used in this paper improves the calibration accuracy compared with the initial estimation of external parameters.

Keywords: 3D LiDAR; 3D coordinate system transformation; ICP; DBSCAN; fragmented iteration

1 引言

近年来, 人工智能与数据科学给汽车工业带来

了革命性的进步, 智能驾驶技术得到了充分的发展。现有的导航定位系统通常使用 GNSS/INS 组合系统

基金项目: 上海市科学技术委员会科研计划项目 (No. 17511106700) 资助。

作者简介: 叶珏磊 (1993 -), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为组合导航定位。E-mail: yejuelel@qq.com

通讯作者: 周志峰 (1978 -), 男, 博士, 硕士生导师, 主要研究方向为车辆自动驾驶。E-mail: zhousjtu@126.com

收稿日期: 2019-06-19; **修订日期:** 2019-07-09

进行导航定位,卫星导航系统通过卫星信号在全球坐标系内提供速度和位置信息,惯性导航器件通常分为加速度计和陀螺仪,可以提供载体的方向加速度和角加速度。但 GNSS 与 INS 组合导航系统仍有其缺点,当 GNSS 在城市峡谷或者隧道中行驶时,天线信号受到遮挡或因多路径效应导致 GNSS 无法定位时,单一依靠惯性器件的系统误差会随着时间延续而累积,导致载体偏离规划路径。随着激光雷达三维扫描成像技术的发展,现在越来越多的研究者在导航系统中加入激光雷达,激光雷达具有厘米级精度,测距距离大,抗干扰能力强,根据线束的多少可以测量不同的垂直角度,现今大多数研究是利用激光雷达的数据进行障碍物聚类分类,环境感知,辅助定位等^[1-2]。但 LiDAR 获取的雷达数据是定义于激光雷达坐标系内,大多数应用必须结合其他系统如惯性导航系统/卫星导航系统。传感器位姿关系的确定对多传感器空间信息融合有直接影响,是研究多源融合导航定位算法的基础^[3]。为了加强导航定位系统的总体质量和精确性,校正并标定各个传感器之间的关系具有重要意义。

许多学者对此课题做了不同的研究:文献[4]提出了一种用于多光束激光雷达扫描仪的自主外部参数校准技术。该方法将外部参数校准程序分解为两部分:通过地平面估算俯仰角和横滚角引起的旋转矩阵;通过在一系列姿态中匹配杆状障碍物来计算由航向角控制的旋转矩阵。文献[5]提出了一种多波束激光雷达传感器标定参数的自动优化方法,该方法定义了一个能量函数来惩罚远离局部平面的点来优化校正模型的不同参数。文献[6]提出了一种将三维激光扫描技术与位置、姿态确定技术相结合的标定方法。文献[3]、[7]针对激光雷达的扫描中心和扫描光束大多不可见的问题,提出首先使用太阳能电池来找到激光雷达扫描线的准确位置,用玻璃反射和撞击激光流,得到控制点在激光雷达坐标上的坐标,最后利用全站仪测得其地心地固坐标后,最后采用改进的 Gauss-Newton 方法建立三维坐标变换模型计算激光雷达的外部参数。文献[8]使用直线行驶车辆的三维激光雷达和 GPS/INS 组合导航系统数据,用于选择具有相似距离和相反方向的点云以形成

点云对。基于连续多对点云同时匹配,遍历多步参数区域迭代的方法获取外部参数。但标定过程中没有考虑高度参数。在文献[9]中提出的激光雷达内部参数两步标定法,采用标靶场对激光雷达实现全视场的角度标定,再利用基线场完成距离标定。这种分离了角度与距离的标定,降低了两者的耦合性。在文献[10]中通过三维激光扫描测量系统(LS)与多台经纬度测量仪(TMS)对激光雷达/惯导/GNSS 进行了室内安置参数标定方法研究,但连接杆和天线表面材质会对反射率的测量精度产生影响。文献[11]中采用分步标定法对三维激光雷达安置参数进行标定,先完成对激光雷达俯仰角、横滚角和纵向位移的标定,再以此为基础对同一标定目标进行中心聚类,在二维面内对此目标进行直线拟合,根据斜率计算航向角,由此得到安置参数,但对地面点云和标定杆提取的精确度会影响标定算法的精度和效率。

基于以上所述,本文提出了一种标定方法:先对初始标定参数进行粗略测量后通过分步迭代法迭代初始参数附近的值,并基于 KD 树优化的 DB-SCAN 将转换到唯一坐标系下的相邻帧点云集位置重合度进行评价,寻求最准确标定参数。最后使用 ICP 算法对不同分步步长求解,得到的最优标定结果进行了对比和验证。此标定模型来源于地理参考模型并与环境中的目标点云的状态有关,标定参数包括激光雷达与惯导载体坐标系的杆臂量和欧拉角。相比于传统标定测量方法需使用经纬仪或全站仪,且对目标匹配物要求较高,标定算法只使用到了激光雷达与 INS/GNSS 的观测数据,程序将执行整个标定过程并输出最优标定结果。

2 标定方法

2.1 坐标系关系

地理参考模型如图 1 所示,激光雷达坐标系为 l 系,原点位于激光雷达结构中心, X 轴指向激光雷达的正前方, Y 轴垂直于 X 轴指向雷达左侧, Z 轴垂直于 X,Y 轴指向上,IMU 载体坐标系定义为 b 系, b 系原点通常取惯性仪 IMU 的测量中心, X 轴指向运动载体右方, Y 轴朝向载体前进方向, Z 轴垂直于 X,Y 轴指向上方。当地水平坐标系定义为 N 系(N,E,D), N 指向地理北方向, E 指向地理东

方向, D 顺着重力指向地面。因为 GNSS 接收机输出的大地经度和纬度和高度表示的大地坐标 (L, B, H) 是一种椭球面上的坐标, 不能直接应用于导航定位计算^[12], 因此将其转换为空间直角坐标系 m 系。

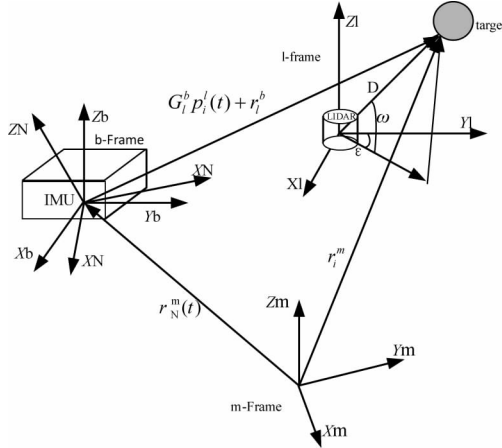


图 1 地理参考模型

Fig. 1 Geographic reference model

由图 1 可以推出以下公式:

$$r_i^m(t) = G_N^m(t) G_b^N(t) (G_l^b(t) p_i^l(t) + r_l^b) + r_N^m(t) \quad (1)$$

式中, $r_i^m(t)$ 是 t 时刻第 i 帧激光雷达的点云在空间直角坐标系下的坐标向量; $G_N^m(t)$ 是导航系转换到空间直角坐标系下的转换矩阵, $G_N^m(t)$ 的转换公式如下^[13]:

$$G_N^m(t) = \begin{bmatrix} -\cos L \sin B & -\sin L & -\cos L \cos B \\ -\sin L \sin B & \cos L & -\sin L \cos B \\ \cos B & 0 & -\sin B \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, L 和 B 分别是接收机输出的经纬度; $G_b^N(t)$ 是载体坐标系与导航坐标系之间的转换矩阵; G_l^b 是激光雷达 l 系与 IMU 载体坐标系 b 系之间的旋转矩阵, 是由 l 系与 b 系之间坐标轴的欧拉角计算所得, $r_l^b(t)$ 是 IMU 中心在空间直角坐标系的坐标向量^[13]。 G_l^b 与 $G_b^N(t)$ 转换公式如式 (2) 所示:

$$\begin{aligned} G_l^b &= G_b^N = G_Z^{\text{Yaw}}(\alpha) G_X^{\text{Pitch}}(\beta) G_Y^{\text{Roll}}(\gamma) \\ &= \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & -\sin \gamma \\ 0 & \sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \beta & \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma & \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma \\ \sin \alpha \cos \beta & \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma & \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma - \cos \alpha \sin \gamma \\ -\sin \beta & \cos \beta \sin \gamma & \cos \beta \cos \gamma \end{bmatrix} \quad (3) \end{aligned}$$

其中, 假设 α, β, γ 分别是横滚角 (Roll)、俯仰角 (Pitch)、偏航角 (Yaw) 对应的角度。偏航角是指坐标系绕着 Z 轴旋转 α 角度, 俯仰角是指坐标系绕着 X 轴转动 β 角度, 横滚角是指坐标系绕 Y 轴旋转 γ 角度。这一组欧拉角唯一确定了 l 系与 b 系、 b 系与 N 系的姿态关系。若假设 l 系与 b 系平移量为 0 且两系原点重合, 则三次旋转后的 l 系可与载体坐标系 b 系重合; 矩阵 $G_Z^{\text{Yaw}}(\alpha) G_X^{\text{Pitch}}(\beta) G_Y^{\text{Roll}}(\gamma)$ 相乘的顺序不可发生改变, 若顺序改变则会影响 G_l^b 的最终结果^[8]。 p_i^l 是第 i 帧激光雷达点云在 l 系下的位置向量; r_l^b 是 IMU 中心与 l 系激光雷达中心的杆臂量, 即为两坐标系之间的平移向量。 r_l^b 和 G_l^b 需由标定过程所决定。

在 l 系中, 目标点云 p_i^l 定义如下:

$$p_i^l = \begin{bmatrix} X_i^l \\ Y_i^l \\ Z_i^l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D \times \cos(\omega) \times \sin(\varepsilon) \\ D \times \cos(\omega) \times \cos(\varepsilon) \\ D \times \sin(\varepsilon) \end{bmatrix} \quad (4)$$

由于雷达封装的数据包仅为水平旋转角度和距离参量, 为了呈现三维点云的效果图且方便计算, 将极坐标系下的角度和距离信息转化为笛卡尔坐标系下的 X, Y, Z 坐标。如图一所示, 此处的 X_i^l, Y_i^l 和 Z_i^l 是激光雷达点投影到 l 系下的坐标; ω 是激光雷达垂直通道所决定的垂直角度; ε 为激光的水平旋转角度, 即物体与 l 系的 Y 轴之间的角度。

2.2 数据采集与处理

利用量尺测量激光雷达相对于接收机的相对位移 $X_\Delta, Y_\Delta, Z_\Delta$; 对于欧拉角, 通常激光雷达安装于雷达支架顶部, 水平放置且数据导出线朝向车尾, 相对于 b 系的翻滚角 (Roll) 和俯仰角 (Pitch) 为 0° , 偏航角 (Yaw) 为 90° 。如果不以此种方式安装, 则需测量 Roll、Pitch 和 Yaw 角的角度值; 测量方式可以使用带有竖直边沿的竖直墙面作为扫描目标, 对 LiDAR 系统与 IMU 系统之间的安置误差角进行标定的方法^[14]。利用这个相对位移向量 ($X_\Delta, Y_\Delta, Z_\Delta$ Roll, Pitch, Yaw), 得到 LiDAR 与 IMU 之间的变换矩阵 G_l^b 与杆臂量 r_l^b 。寻找一个有较明显固定特征物的场景, 如有墙、阶梯、树木等垂直二维面的场景, 驾驶载体在场景内行驶, 低速行驶同时记录下激光雷达点云的数据和 GNSS/INS 接收机的大地坐标数据, 录制两到三分钟内的数据包, 然后在数据包内

随机取大约 100 帧的点云数据 $(p_0^1, p_1^1, \dots, p_k^1)$ 和对应帧的 IMU 在大地坐标系下数据 $(r_b^m, r_b^m, \dots, r_b^m)$, 将这些数据保存下来用作标定后处理。

这些记录的点云数据 $(p_0^1, p_1^1, \dots, p_k^1)$, 其实是当前周边特征物相对激光雷达的坐标位置, 对每帧点云依次左乘 LiDAR-IMU 的坐标变换矩阵 G_1^b 后加上杆臂量 r_1^b , 此时就得到了特征物相对 IMU 载体坐标系 b 系的坐标位置, 然后再乘以每帧对应的 b 系到 N 系的旋转矩阵 $G_b^N(t)$ 后左乘 $G_N^N(t)$ 加上 $r_b^m(t)$ 平移量, 就能得到特征物点云在空间直角坐标系的坐标位置。由于空间直角坐标系是唯一的, 所以最后得到的即特征物的实际位置, 利用此方法可以得到空间直角坐标系中点云位置 $(r_{p0}^m, r_{p1}^m, \dots, r_{pk}^m)$ 。

2.3 分步迭代法计算评价系数

计算 $(r_{p1}^m, r_{p2}^m, \dots, r_{pk}^m)$ 相互间的评价系数 M , 我们的目标函数就是求评价函数系数 M 的最大值:

$$M_{\max} = f(X_{\text{best}}, Y_{\text{best}}, Z_{\text{best}}, \text{Roll}_{\text{best}}, \text{Pitch}_{\text{best}}, \text{Yaw}_{\text{best}}) \quad (4)$$

在这里我们采用分步迭代法不断调整相对位移向量 $(X_{\Delta}, Y_{\Delta}, Z_{\Delta}, \text{Roll}, \text{Pitch}, \text{Yaw})$ 的值, 一次遍历一个参数。全局遍历法需要对数据的最小步长单位进行遍历, 若数据量过于庞大, 则对处理系统而言压力较大且耗时较长。分步迭代法先在区间内求出局部最优解, 再在局部最优解周边寻求全局最优解, 与全局遍历法相比加快了遍历速度, 提高了效率。

对于通过式(1)转换到空间直角坐标系下的目标物点云位置数据 $(r_{p0}^m, r_{p1}^m, \dots, r_{pk}^m)$, 由于每帧点云都包含数十万多个点, 数据量巨大; 若对相邻两帧点云数据进行直接散点遍历匹配会导致程序运行时间很长, 效率低下。因此本文提出基于 Kd-树优化的 DBSCAN 聚类算法进行点云遍历, 降低了程序的复杂度。设置目标物点与点在空间直角平面坐标系下最小距离的阈值 E_{ps} 与聚类最小点数 MinPts , 对每帧点云进行聚类, 得到单帧下的多团点云簇。对相邻两帧间目标物点云簇的聚类结果的中心点进行距离计算, 距离越小, 代表着以当前标定参数的精确度越高, 则评价系数 M 越大, 如图 2 所示。当对六个标定参数都进行完分布迭代法的遍历与评价函数的计算后, 评价系数 M 的最大值情况下的 $(X_{\text{best}}, Y_{\text{best}},$

$Z_{\text{best}}, \text{Roll}_{\text{best}}, \text{Pitch}_{\text{best}}, \text{Yaw}_{\text{best}})$, 即 $r_1^b = (X_{\text{best}}, Y_{\text{best}}, Z_{\text{best}}), \text{Roll}_{\text{best}}, \text{Pitch}_{\text{best}}, \text{Yaw}_{\text{best}}$ 就是我们所求的最优标定参数。

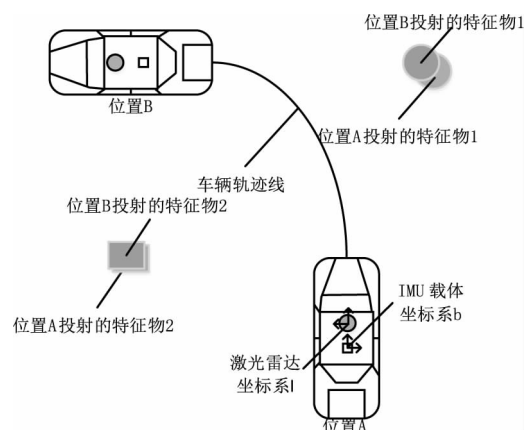


图 2 相邻点云帧特征物点云的重合

Fig. 2 Coincidence of adjacent point cloud frame feature point cloud

3 实验设计与分析

3.1 实验设计

本次实验采用速腾聚创的 16 线激光雷达和上海司南卫星导航技术股份有限公司的 GNSS/INS 接收机 M600-mini 来采集标定环境数据。图 3 是在本次实验中使用的实验平台。表 1 与表 2 给出了接收机和激光雷达的具体参数。对于接收机和激光雷达点云 PCD 的数据, 统一接入基于 Ubuntu 的 ROS(机器人操作系统)中, 使用 C++ 语言编写本文的算法程序。调用 PCL 库中的函数并根据高度差值滤掉低于激光雷达高度的所有地面点云, 优化点云的大小, 便于筛选出目标物点云, 使本文的目标物点云数据更加精确。

表 1 司南 M600-mini 接收机参数

Tab. 1 The parameters of sino M600-mini

司南 M600-mini 接收机惯导部分			司南 M600-mini 接收机 GNSS 部分		
	加速度计	陀螺仪		H	V
测量量程	$\pm 4 \text{ g}$	$\pm 250^\circ/\text{s}$	RTK 精度	10 mm + 1 ppm	20 mm + 1 ppm
稳定性	35°/h	40 mg	静态差分精度	2.5 mm + 1 ppm	5.0 mm + 1 ppm

为了减少实验的误差源, 标定测试场景在上方无遮挡的场景下进行, 保证载波相位差分 (RTK) 信号较好。图 4 即为通过三维激光雷达点云拟合出的行驶环境三维地图, 矩形所示部分是行驶的道路, 图

5 为图 4 中间白色矩形部分放大后的道路点云图,在路的两端有很多树木,具有固定特征有助于提取出其结构用于标定,可以有助于对相邻帧的点云重合度进行评价并可帮助建立三维高精度地图。本文在当前场景下的车速为 10 km/h,保证了点云的连续性与密集性。

表 2 速腾聚创 16 线激光雷达参数

Tab. 2 Robosense 16-line lidar parameters

最大测量距离	150 m
测量精度	± 2 cm
垂直测角	$30^\circ (-15^\circ \sim 15^\circ)$
水平视角	360°
水平角分辨率	$0.09^\circ (5 \text{ Hz})$ 至 $0.36^\circ (20 \text{ Hz})$



图 3 标定所用测量系统

Fig. 3 Calibration system used in experiment

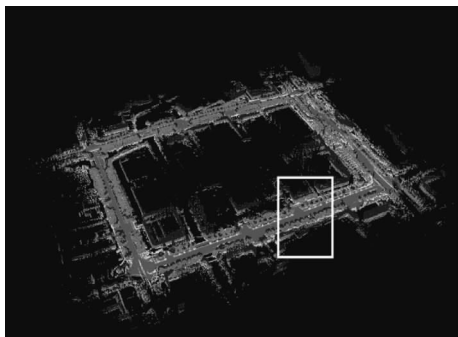


图 4 标定测试场地地图

Fig. 4 Calibration test site map

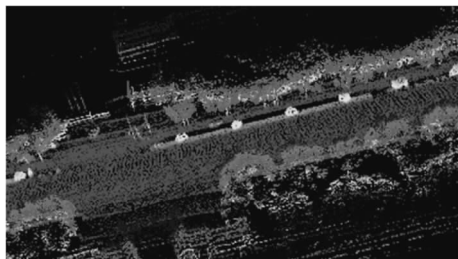


图 5 某路段道路环境点云图

Fig. 5 Road environment point cloud map of a road section

3.2 校准结果与分析

对于初始安置参数,采用不同的分步步长来验证本文采取的分步步长是否为精确度更优的步长。因为激光雷达与接收机都置于车载体平面上,因此 Pitch 角与 Roll 角的值不会相差太大,而 Yaw 偏航角的值会因安装方式的不同而差异巨大,因此我们设计对 Yaw 角加大遍历的区间。步长设计如表 3 所示。

表 3 分步迭代法局部最优与全局最优步长设计

Tab. 3 Design of fragmented iterative method local optimization and global optimal step size

	实验 1 初次迭代步长 全局步长	实验 2 初次迭代步长 全局步长	实验 3 初次迭代步长 全局步长
Yaw/($^\circ$)	$1^\circ \in \pm 8^\circ$ $0.1^\circ \in \pm 0.5^\circ$	$1^\circ \in \pm 12^\circ$ $0.1^\circ \in \pm 0.5^\circ$	$0.5^\circ \in \pm 8^\circ$ $0.05^\circ \in \pm 0.5^\circ$
Pitch/($^\circ$)	$1^\circ \in \pm 5^\circ$ $0.1^\circ \in \pm 0.5^\circ$	$1^\circ \in \pm 8^\circ$ $0.1^\circ \in \pm 0.5^\circ$	$0.5^\circ \in \pm 5^\circ$ $0.05^\circ \in \pm 0.5^\circ$
Roll/($^\circ$)	$1^\circ \in \pm 5^\circ$ $0.1^\circ \in \pm 0.5^\circ$	$1^\circ \in \pm 8^\circ$ $0.1^\circ \in \pm 0.5^\circ$	$0.5^\circ \in \pm 5^\circ$ $0.05^\circ \in \pm 0.5^\circ$
X/m	$0.1\text{m} \in \pm 0.3\text{m}$	$0.1\text{m} \in \pm 0.5\text{m}$	$0.05\text{m} \in \pm 0.3\text{m}$
Y/m	$0.01\text{m} \in \pm 0.05\text{m}$	$0.01\text{m} \in \pm 0.05\text{m}$	$0.005\text{m} \in \pm 0.05\text{m}$
Z/m			

在这个实验中,通过采集激光雷达数据与 GNSS/INS 的数据来实施校准。首先通过测量得到初始安置参数。表 4 展示了安置初始参数杆臂量与旋转角,加上实施算法后实现的校准结果。可见杆臂量和旋转角与初始值相比有了很大的变化。如果我们不进行杆臂量和旋转角的优化校准,那么激光雷达获取的数据都是不可靠的并且会严重影响激光雷达点云帧之间的配准。

通过上述算法得到最优标定参数后,对整个实验的标定结果进行一个验证分析。通过使用 ICP 最近迭代法算法对本文的算法得到的标定结果进行了验证:将点云数据 $(p_0^l, p_1^l, \dots, p_k^l)$ 转换到 m 系下后,设置好 ICP 的最大迭代次数、均方误差和的阈值、前后变换矩阵的差异阈值后,与对相邻帧的点云采用 ICP 算法进行匹配并给出结果,通过调用 `icp.getFitnessScore()` 函数获取源点云与目标点云对应的最近点欧氏距离的平方和得到匹配分数,得分越小说明匹配越好。本文随机截取其中的五个相邻帧的结果列出,如表 5 所示,可以看出采用本文算法迭代后的 X, Y, Z 移动偏差保持在较低水平。

表 4 初始测量安置参数与实验计算得最优标定参数

Tab. 4 Initial measurement placement parameters and experimentally calculated optimal calibration parameters

	Roll/(°)	Pitch/(°)	Yaw/(°)	X/m	Y/m	Z/m	Time/s
初始数据	0	0	1.57	0.22	1.05	0.95	120
实验一	0.0087	-0.0017	1.5072	0.22	1.05	0.65	
实验二	0.0087	-0.0017	1.5072	0.22	1.05	0.45	
实验三	0.0087	0	1.5072	0.42	1.25	1.15	

表 5 ICP 算法验证最优外参的重合结果

Tab. 5 Algorithm to verify the results of the optimal external parameters

		X 方向的移动/m	Y 方向的移动/m	Z 方向的移动/m	匹配得分
初始数据	随机帧 1	-0.0204	-0.0712	0.1423	9.3439
	随机帧 2	-0.0883	0.0442	-0.1621	9.6024
	随机帧 3	-0.0354	0.0018	0.33	8.4571
	随机帧 4	-0.0073	-0.1331	0.1696	7.377
	随机帧 5	0.0135	-0.0349	0.0859	12.1372
实验一	随机帧 1	0.0057	0.0222	-0.0055	9.2636
	随机帧 2	-0.1073	-0.0838	0.0783	9.1958
	随机帧 3	-0.0699	0.0793	0.1076	8.2866
	随机帧 4	-0.0438	0.0601	0.1809	7.3041
	随机帧 5	-0.0215	-0.0717	-0.0018	12.0518
实验二	随机帧 1	-0.0561	0.0834	0.1334	9.2636
	随机帧 2	-0.1073	-0.0838	0.0783	9.1958
	随机帧 3	0.0699	0.0793	0.1076	8.2865
	随机帧 4	-0.0438	0.0601	0.1809	7.3041
	随机帧 5	-0.0215	-0.0717	-0.0018	12.0518
实验三	随机帧 1	-0.0388	0.0830	0.1372	9.2991
	随机帧 2	-0.0163	-0.1222	-0.0248	8.888
	随机帧 3	-0.0343	0.0245	0.0992	8.3277
	随机帧 4	0.0259	0.0598	-0.2757	7.3567
	随机帧 5	-0.1165	-0.0371	-0.0431	12.0856

图 6 是经过实验一、二、三得到的安置参数与初始安置参数的得分对比。因为匹配得分越小说明匹配效果越好,我们对得分依次转换为倒数。经过 ICP 算法对标定后的结果验证,本文算法确实提升

了激光雷达系中目标物转到空间直角坐标系下的转换结果的精度。实验一与实验二相比扩大了初次迭代的区间范围,但两次实验的得分结果相近,证明最优解是存在区间范围的,超过这个区间范围的迭代是无意义的。实验一与实验三对比,实验三缩小了迭代步长,但得到的点云匹配结果是最高的,且耗时最长。

4 结 语

多波束激光雷达在机器人、智能驾驶领域的重要性正在与日俱增,强大的 3D 感知能力使其在 3D-SLAM 中无法替代,将来也会有更多针对于激光雷达应用的研究。对于任何传感器,校准是生成有效数据之前最重要的过程之一。为了提升激光雷达与 GNSS/INS 之间的传感器相关度和传感器组合的表现,本文提出一种计算最优安置参数的标定方法,对初始安置参数进行测量后通过分步迭代法迭代初始

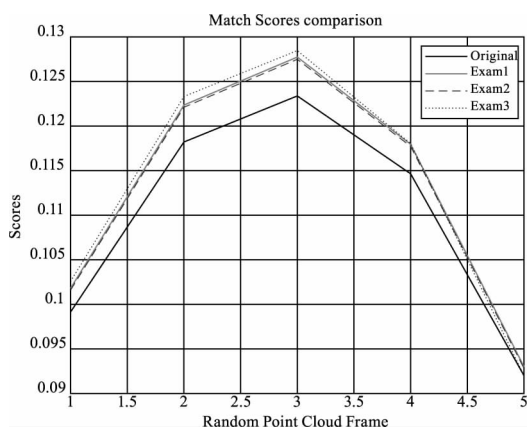


图 6 匹配度得分对比图

Fig. 6 Match Scores comparison

参数附近的值,基于KD树优化的DBSCAN算法评价相邻帧点云重合度以得到最准确的安置参数。并利用ICP算法对得到的最优安置参数进行了验证和评估,实验测试结果表明:①安置参数在步长减小的情况下精度会得到一定的提高。②本文采用的算法相比初始估计外参明显提高了标定精度,具有可靠性与优越性。后期的工作将着重于改进本文的算法达到精度的量化。

参考文献:

- [1] LIU Bin, ZHANG Jun, LU Min, et al. Research progress of laser radar applications[J]. Laser & Infrared, 2015, 45(2):117-122. (in Chinese)
刘斌, 张军, 鲁敏, 等. 激光雷达应用技术研究进展[J]. 激光与红外, 2015, 45(2):117-122.
- [2] WANG Hui, LUO Tao, LU Peiyuan. Development of the LiDAR applications in unmanned vehicles and its key technology analysis[J]. Laser & Infrared, 2018, 48(12):1458-1467. (in Chinese)
王会, 罗涛, 陆培源. 激光雷达在无人车辆中的应用及关键技术分析[J]. 激光与红外, 2018, 48(12):1458-1467.
- [3] 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):107-112.
- [4] Zhu Zhu, Liu Jilin. Unsupervised Extrinsic Parameters Calibration for Multi-beam LIDARs[C]//International Conference on Computer Science and Electronics Engineering, 2013:1110-1113.
- [5] Nouira H, Deschaud J E, Goulette F. Target-free extrinsic calibration of a mobile multi beam LIDAR system[J]. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2015, II-3/W5:97-104.
- [6] Shen Yan, Li Lei, Ruan Youtian. Mobile mapping technology by vehicle-borne LIDAR[J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(3):432-437.
- [7] 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)
康永伟, 钟若飞, 吴侯. 车载激光扫描仪外参数标定方法研究[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(S):249-253.
- [8] HAN Dongbin, XU Youchun, WANG Rendong, et al. Calibration of three-dimensional lidar extrinsic parameters based on multiple-point clouds matching[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(2):455-462. (in Chinese)
韩栋斌, 徐友春, 王任栋, 等. 基于多对点云匹配的三维激光雷达外参数标定[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(2):455-462.
- [9] WU Fenzhi, GUO Shaogang, ZHU Feihu, et al. Two-Step calibration method of lidar sensor based on calibration field[J]. Aerospace Control and Application, 2017, 43(4):57-62. (in Chinese)
吴奋陟, 郭绍刚, 朱飞虎, 等. 基于标定场的激光雷达两步标定方法[J]. 空间控制技术与应用, 2017, 43(4):57-62.
- [10] ZHOU Yanglin, LI Guangyun, WANG Li, et al. A rapid extrinsic calibration method for GNSS/INS/LiDAR integrated navigation system[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2018, 26(4):458-463, 477. (in Chinese)
周阳林, 李广云, 王力, 等. 一种GNSS/INS/LiDAR组合导航传感器安置关系快速标定方法[J]. 中国惯性技术学报, 2018, 26(4):458-463, 477.
- [11] CHEN Guibin, GAO Zhenhai, HE Lei. Step-by-step automatic calibration algorithm for exterior parameters of 3D lidar mounted on vehicle[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(10):249-255. (in Chinese)
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):249-255.
- [12] SHI Xingxi. Research on positioning technology for intelligent mobile robots[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2010. (in Chinese)
石杏喜. 面向智能移动机器人的定位技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2010.
- [13] LIU Shanhong, DENG Caiqun. Transformation of coordinate system[J]. Journal of Jilin Jianzhu University, 2016, 33(1):43-47. (in Chinese)
刘山洪, 邓彩群. 坐标转换与坐标变换研究[J]. 吉林建筑大学学报, 2016, 33(1):43-47.
- [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.