

基于多对点云匹配的三维激光雷达外参数标定

韩栋斌¹, 徐友春², 王任栋¹, 齐尧¹, 李华²

¹中国人民解放军军事交通学院研究生管理大队, 天津 300161;

²中国人民解放军军事交通学院军用车辆系, 天津 300161

摘要 针对无人车三维激光雷达与全球定位系统/惯性导航系统组合导航系统安装位置关系难以准确测量及相对转角无法直接测量的问题,提出一种基于多对点云同时匹配迭代生成外参数的方法。首先选择车辆直线往返行驶中位置相近、方向相反的激光雷达点云对进行匹配;然后设定参数区域中心、初始步长及步数,遍历参数组合,寻找目标函数最小时的外参数组合并更新为最优迭代区域中心;最后不断缩减步长,直到得到满足精度要求的最优外参数。实验采集了两段环境不同的数据,分别采用较优和较差的参数初始迭代中心以及不同步数进行标定。结果表明,所提方法用时短,对于非理想参数初值也能够得到较好的标定结果,而且标定方法简单,无需专门的标定物即可达到需求的标定精度。

关键词 遥感; 三维激光雷达; 点云匹配; 区域迭代; 外参数标定

中图分类号 TP75 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.022803

Calibration of Three-Dimensional Lidar Extrinsic Parameters Based on Multiple-Point Clouds Matching

Han Dongbin¹, Xu Youchun², Wang Rendong¹, Qi Yao¹, Li Hua²

¹ Postgraduate Training Brigade, Military Transportation University of PLA, Tianjin 300161, China;

² Department of Military Vehicle, Military Transportation University of PLA, Tianjin 300161, China

Abstract To solve the problem that the exact position relation between three-dimensional lidar and global positioning system/inertial navigation system integrated navigation system cannot be obtained directly and the relative rotation angle between them cannot be directly measured, a method based on simultaneous matching of multiple-point clouds is proposed to calibrate the extrinsic parameters. Firstly, the lidar point clouds, which are similar in position and opposite in direction, are selected as the calibration data. Secondly, we set the parameters of the initial regional center, the initial step length and the step counts, then traverse the combination of parameters to find the optimal target function when the corresponding extrinsic parameters are updated to the optimal iterative regional center. We shorten the step length continuously, until optimal extrinsic parameter that satisfies accuracy requirement is obtained. The experiment collects two different data in different environments, and uses better and worse parameter initial iterative center and different step counts to calibrate. Results show that the proposed calibration method has a short time duration, and can get good calibration results for non-ideal initial parameters. The method is simple, and can achieve required calibration accuracy without special calibration object.

Key words remote sensing; three-dimensional lidar; point cloud matching; regional iteration; extrinsic parameter calibration

OCIS codes 280.3640; 150.1488; 150.6910

收稿日期: 2017-08-22; 收到修改稿日期: 2017-09-12

基金项目: 国家自然科学基金(91220301)、国家 973 计划(2016YFB0100903)

作者简介: 韩栋斌(1994—),男,硕士研究生,主要从事无人车环境感知方面的研究。E-mail: hanjalison@126.com

导师简介: 徐友春(1972—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事智能车辆技术方面的研究。

E-mail: xu56419@126.com

1 引言

三维激光雷达凭借其高精度、高分辨率及高可靠性等特性,成为了无人车障碍物检测与跟踪、三维地图构建等领域中重要的传感器。同样作为无人车感知的重要部分,全球定位系统(GPS)/惯性导航系统(INS)组合导航系统提供车辆位姿信息,回答了无人车“在哪”的问题。两者相互补充,实现无人车的全局定位与局部感知。两者融合使用的前提是需要对两者安装的相对位姿进行标定。

三维激光雷达坐标系与 GPS/INS 组合导航系统坐标系之间准确的相对位置和转角关系难以通过简单目测及手工测量直接获得。所以,需要通过算法实现两者之间的精确标定。在同时定位与建图应用方面,良好的标定结果为后续点云配准过程提供了更好的初始位置,能够减少建图配准过程的计算量,可以提高建图精度和效率。

针对三维激光雷达外参数标定问题,Zhu 等^[1]提出了一种无监督三维激光雷达外参数标定方法,对 6 个外参数进行解耦求解,但仅对三维激光雷达相对于地面坐标系进行了研究;Underwood 等^[2]提出了通过对特定标定物的匹配来求解三维激光雷达外参数的方法,但其依赖特殊标定物;罗志锋等^[3]提出了一种基于小车直线行驶、原地旋转轨迹特征的标定方法,对于无人车而言,原地转弯难以实现,并且该方法只能求解二维外参数。Levinson 等^[4]提出了一种采集车辆转弯数据、利用 64 线激光雷达中 64 个单激光束连续多帧激光点云叠加的三维环境进行匹配求解激光雷达外参数的方法;该方法同时适用于三维激光雷达内、外参数的标定,但其计算量大、耗时长、效率低,并且对初值比较敏感,容易陷入局部最优解,若仅用于解决外参数标定问题,就会稍显复杂。Nouira 等^[5]基于文献[4]提出了一种基于平面特征的无监督外参数优化方法,优化了迭代过程并提出了标定参数评价指标,但不具备通用性。将文献[5]的方法与文献[4]所提方法进行比较发现,前者的标定效果和速度均有明显改善,但算法复杂,实现难度较大。据此,本文提出在三维激光雷达内部参数标定准确、GPS/INS 组合导航系统工作正常的前提下,采集车辆直线往返行驶时激光雷达点云和 GPS/INS 组合导航系统的位姿数据,选取位置相近、方向相反的点云组成点云对,同时匹配多对点云,通过多步数参数区域迭代生成三维激光雷达外参数的标定方法。

2 标定方法

所搭建实验平台如图 1 所示。该平台顶部安装 GPS 天线,后轴中心安装高精度光纤惯性/卫星组合导航系统,实时提供高精度的位姿信息。安装的 Velodyne-64HDL(美国 Velodyne 公司)激光雷达,通过旋转扫描得到 $0^\circ \sim 360^\circ$ 范围内的环境信息。设置 GPS/INS 组合导航系统数据频率为激光雷达扫描频率的 10 倍,可以满足时间同步要求。

2.1 坐标系建立

三维激光雷达坐标系原点 O_1 建立在三维激光雷达上某点。理论上三维激光雷达坐标系的原点应该在激光雷达安装底座的中心点,但三维激光雷达内部安装配置等固有属性导致坐标系原点并非严格位于此位置。三维激光雷达自转的旋转角 0° 方向为 Y_1 轴的正方向,自转轴向上方向为 Z_1 轴的正方向,根据右手定则可确定 X_1 轴的正方向,得到 $O_1-X_1Y_1Z_1$ 坐标系,如图 1 所示。

GPS/INS 组合导航系统通过多传感器融合输出车辆位姿数据。由于 GPS 天线及 INS 均固定连接在车体上,同属一个刚体,姿态角相同。所以,组合导航系统坐标系中以 GPS 天线上经纬度数据表示的位置为原点 O_g ,INS 设备上“箭头”所指方向为 Y_g 轴的正方向,垂直于 INS 平面向上为 Z_g 轴的正方向,根据右手定则,得到 X_g 轴的正方向,得到 $O_g-X_gY_gZ_g$ 坐标系,如图 1 所示。



图 1 实验平台

Fig. 1 Experimental platform

外参数标定即为获得 $O_1-X_1Y_1Z_1$ 坐标系相对于 $O_g-X_gY_gZ_g$ 坐标系的旋转参数 \mathbf{R} 和平移参数 \mathbf{T} 。

三维激光雷达坐标系下点云坐标通过
$$\begin{pmatrix} x_g \\ y_g \\ z_g \end{pmatrix} = \mathbf{R} \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix} + \mathbf{T}$$
 即可转换到 GPS/INS 组合导航

系统坐标系下。

2.2 数据预处理

选择在差分信号良好的条件下,采集无人车行驶时的三维激光雷达和 GPS/INS 组合导航系统数据,记录每帧三维激光雷达点云采集初始时刻相应的 GPS/INS 组合导航系统位姿数据作为位姿标签,实现两类传感器之间的时间同步。

采集得到的三维激光雷达的原始数据是以距离的形式存储的,为实现车辆周围环境的三维重建,需要根据三维激光雷达每个激光束的角度偏移量、位置偏移量等内参数,及相应时刻的雷达转角等信息将激光雷达距离数据解析成三维坐标的形式;由于车辆运动直接解析得到的三维坐标存在一定的偏差,故需要在解析得到单帧激光雷达点云坐标之后,根据无人车运动状态参数对每帧点云中点的坐标进行位置修正,减小车辆运动对三维重建造成的畸变影响。

GPS/INS 组合导航系统主要用于反映车辆的实时位姿,配合三维激光雷达实现无人车重建三维环境。车辆的位置数据是通过获取差分 GPS 得到的经纬度数据。为便于计算,根据经纬度转换平面坐标的关系^[6-7]将每帧点云对应的车辆的经纬度转化到平面坐标系,得到无人车在该平面坐标系下的

坐标。

2.3 目标函数的建立

理论上,在 GPS 差分状态良好的条件下,将修正好的激光雷达点云依据当前帧点云对应的位姿数据投影到三维空间,可以实现三维环境的重建。实际上由于车辆采集的位姿数据并非三维激光雷达的位姿,而是 GPS/INS 组合导航系统的位姿数据,所以,依据车辆直接采集的车辆的位姿数据不能实现三维环境的重建,并且偏差主要为三维激光雷达坐标系与 GPS/INS 组合导航系统坐标系之间的偏差。基于上述思想,可以通过调整预设的外参数值,使得点云实现较好的匹配,得到最优外参数。本研究提出一种基于同时匹配多对方向相反、距离相近的点云迭代生成三维激光雷达外参数的方法。

根据多对三维激光雷达点云和 GPS/INS 组合导航系统坐标系的相对位姿,以 \mathbf{R} 和 \mathbf{T} 为优化参数,建立反映三维环境重建效果的匹配度目标函数 $J(\mathbf{R}, \mathbf{T})$,其中 \mathbf{R} 和 \mathbf{T} 分别为雷达坐标系相对于导航系统坐标系的旋转矩阵和平移向量。在计算坐标变换时, \mathbf{R} 表现出了其计算方便的优势。假设车辆姿态欧拉角即航向角 θ_{yaw} 、俯仰角 θ_{pitch} 和横滚角 θ_{roll} 对应的角度分别为 α 、 β 和 γ ,则其对应的 3×3 旋转矩阵可以通过下式计算得到:

$$\mathbf{R}(\alpha, \beta, \gamma) = \mathbf{R}_z(\alpha) \mathbf{R}_y(\beta) \mathbf{R}_x(\gamma) = \begin{pmatrix} \cos \alpha \cos \beta & \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma & \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma \\ \sin \alpha \sin \beta & \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma & \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma - \cos \alpha \sin \gamma \\ -\sin \beta & \cos \beta \sin \gamma & \cos \beta \cos \gamma \end{pmatrix}, \quad (1)$$

$$\text{式中 } \mathbf{R}_z(\alpha) = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \mathbf{R}_y(\beta) = \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{pmatrix}, \mathbf{R}_x(\gamma) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & -\sin \gamma \\ 0 & \sin \gamma & \cos \gamma \end{pmatrix}。$$

此处 θ_{yaw} 、 θ_{pitch} 和 θ_{roll} 的顺序不可以改变,如果顺序发生改变,则矩阵相乘的顺序也需做出相应的改变,最终所得旋转矩阵的结果也会不同。 $\mathbf{T} = [x \ y \ z]$ 。与迭代最近点算法类似,不同于通常的点到点的距离,本研究采用点到面的距离[(2)式]作为距离判定依据,建立优化的目标函数:

$$J(\mathbf{R}, \mathbf{T}) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N [\omega_{i,j} d_{i,j}^2(\mathbf{R}, \mathbf{T})], \quad (2)$$

式中 $J(\mathbf{R}, \mathbf{T})$ 表示多对点云对的点对距离平方均值

的均值,表征点云匹配的程度,其值越小,说明匹配程度越高; i 为点云对的编号; M 为点云对的数量; j 为点云对的对应点对编号; N 为对应点对的数量; $\omega_{i,j}$ 为点对距离的权重,若点对之间的距离大于设定的距离阈值,则 $\omega_{i,j} = 0$, 否则, $\omega_{i,j} = 1$; $d_{i,j}(\mathbf{R}, \mathbf{T})$ 的定义为

$$d_{i,j}(\mathbf{R}, \mathbf{T}) = \mathbf{n}_{i,j} [p_{i,j}(\mathbf{R}, \mathbf{T}) - m_{i,j}(\mathbf{R}, \mathbf{T})], \quad (3)$$

$$\begin{cases} p_{i,j}(\mathbf{R}, \mathbf{T}) = \mathbf{R}_{\text{nav}}(p'_{i,j})(\mathbf{R}p'_{i,j} + \mathbf{T}) + \mathbf{T}_{\text{nav}}(p'_{i,j}) \\ m_{i,j}(\mathbf{R}, \mathbf{T}) = \mathbf{R}_{\text{nav}}(m'_{i,j})(\mathbf{R}m'_{i,j} + \mathbf{T}) + \mathbf{T}_{\text{nav}}(m'_{i,j}) \end{cases}, \quad (4)$$

式中 $\mathbf{n}_{i,j}$ 为点的切平面的法向量; $p_{i,j}$ 和 $m_{i,j}$ 分别为第 i 对匹配源点云和目标点云的第 j 个对应点对在全局坐标系下的坐标; $p'_{i,j}$ 和 $m'_{i,j}$ 分别为第 i 对匹配源点云和目标点云的第 j 个对应点对在各自雷达坐标系下的坐标; \mathbf{R}_{nav} 和 \mathbf{T}_{nav} 分别为 GPS/INS 组合导

航系统坐标系相对于平面坐标系的旋转矩阵和平移向量,其值几乎每帧都不相同,随着车辆的位姿变化而变化。

由于每帧点云包含十多万个点,数据量较大,直接搜索会导致算法运行时间很长,本研究采用 k -dimensional(KD)树^[8]快速搜索最近点的方法对上述算法进行优化,以缩短标定时间。采用主成分分析法求解点云中点的法向量,根据每个点距离最近的 20 个点列出协方差矩阵的最小特征值对应的特征向量得到该点的法向量^[9]。分别根据不同的外参数组合 \mathbf{R} 和 \mathbf{T} 求解以上目标函数的值,得到不同外参相应的匹配程度,比较目标函数值并选取最优的外参数。改变外参数初值组合,继续迭代得出最优外参数。

2.4 迭代优化方法

采用参数多步数迭代方法,分别设定每个参数的迭代中心为 a_0 、步长为 d 、步数为 n ,得到每个参数的 $2n+1$ 个参数值。目标函数中待优化参数 \mathbf{R} 通过 θ_{pitch} 、 θ_{yaw} 和 θ_{roll} 等 3 个欧拉角计算得到, \mathbf{T} 由 x 、 y 、 z 等 3 个参数表示,共 6 个参数。然后,根据不同参数

组合计算其相应的目标函数值,将目标函数值最小时对应的参数组合作为下步各自的迭代中心。

通常,通过目测或简单测量预估 a_0 的值。根据预估的参数真值,选用合适的初始步长。标定步数的设定原则是保证预估标定参数真值在初始步长和步数组合包含的范围内。3 个参数确定后,参数的取值为 $a = a_0 + id, \{i | -n \leq i \leq n, i \in \mathbf{Z}\}$,假设 $n = 5$,则参数的可能取值有 11 个,两个位置参数的组合为 121 种组合,依次类推。

采用旋转参数与平移参数交替迭代的方法优化外参数。同一步长条件下,在迭代旋转参数时,平移参数保持其当前最优状态不变,遍历当前旋转参数中心限定区域内参数所有可能的取值组合,寻找目标函数最小值对应的参数并更新为下一次迭代的中心,直到迭代至最优解不发生变化时,将该最优解确定为该步长下的最优解。得到最优旋转参数后,保持旋转最优参数不变,平移参数步长减半,迭代平移参数,寻找最优平移参数,循环交替迭代,直到满足终止条件。标定流程图如图 2 所示。

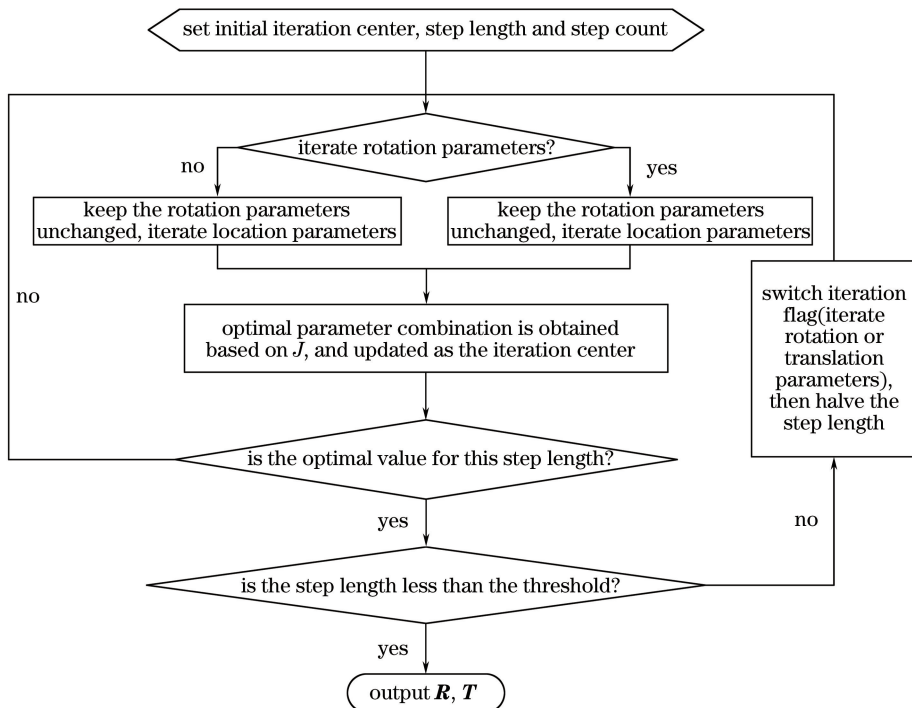


图 2 程序流程图

Fig. 2 Program flow diagram

3 实验及结果

3.1 数据采集

采集车辆在同一直路上匀速(5 km/h)往返行

驶的三维激光雷达和 GPS/INS 组合导航系统数据作为标定数据。低速行驶是为了降低两类传感器时间不完全同步对标定的影响。直线往返行驶时车辆的 θ_{yaw} 不同,满足姿态角改变的求解条件。同时,避

免了转弯时点云的转弯修正环节,减少了其误差对外参数结果的影响。

图3为车辆采集数据轨迹。蓝色矩形框所选段位为标定选用的数据段,右侧蓝框为左侧蓝框的放大图,图中20~24和46~50为点云编号,每个红色箭头表示位置间隔5m的点云对应的GPS/INS组合导航系统输出的相对位置及航向。绿色矩形框所选段位为位置相近、方向相反的点云组成的点云对,例如编号20和50为一对点云对。本研究选择在差分GPS信号较好、有明显地物特征的环境下采集数据进行标定。实验采集了两个不同场景进行标定,如图4所示,分别命名为1号标定场景和2号标定场景。

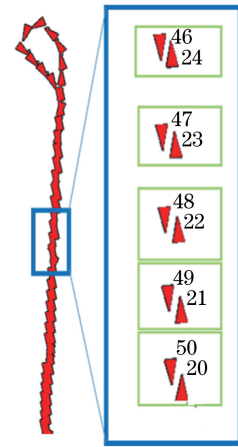


图3 车辆轨迹图

Fig. 3 Vehicle trajectory diagram

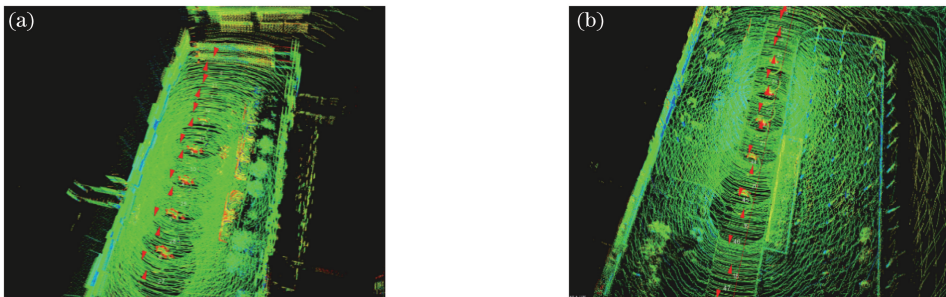


图4 标定前两个标定场景的点云叠加图。(a) 1号标定场景;(b) 2号标定场景

Fig. 4 Two scene point cloud overlay maps before calibration. (a) Calibration scene 1; (b) calibration scene 2

3.2 标定结果分析

3.2.1 较优初始迭代中心标定实验

通过目测预估各参数初值 $y=100\text{ cm}, x=0\text{ cm}, \theta_{\text{yaw}}=\theta_{\text{pitch}}=\theta_{\text{roll}}=0^\circ$, 其中位置参数的真实值在预估值 $\pm 30\text{ cm}$ 附近、角度参数的真实值在预估值 $\pm 3^\circ$ 附近范围内。分别设定不同步长和步数,利用1号标定场景中的数据点进行标定。终止条件为位置步长小于 0.01 cm ,同时角度步长小于 0.001° 。

表1 1号标定场景不同步长和步数条件的标定结果

Table 1 Calibration results using different step lengths and different step counts in calibration scene 1

Step length	Step count	x/cm	y/cm	$\theta_{\text{yaw}}/^\circ$	$\theta_{\text{pitch}}/^\circ$	$\theta_{\text{roll}}/^\circ$	J/cm^2	Time cost/min
20 cm & 2°	1	7.460	124.336	-0.520	0.070	-0.089	25.3404	3.96
	2	7.422	124.434	-0.546	0.064	-0.088	25.3363	16.35
15 cm & 1.5°	1	8.086	123.906	-0.061	0.073	-0.094	25.3504	4.22
	2	8.005	123.972	-0.508	0.070	-0.082	25.3376	17.15
10 cm & 1°	1	7.461	124.336	-0.520	0.070	-0.089	25.3404	3.85
	3	7.227	124.180	-0.541	0.070	-0.084	25.3387	41.56
5 cm & 0.5°	1	7.461	124.336	-0.519	0.070	-0.089	25.3404	3.53
	6	7.227	124.180	-0.541	0.070	-0.084	25.3387	235.26
2 cm & 0.2°	1	7.609	124.633	-0.489	0.075	-0.086	25.3352	4.05
	15	—	—	—	—	—	—	—

步数为 1 的 5 组实验中, 标定时间均在 4 min 左右, 相对于文献[4]中提到的较差标定初值条件下单步数迭代标定出结果的时间约 1 h, 所提方法标定时间明显缩短, 体现了所提标定数据处理方法和目标函数的优势。比较 5 组标定结果, 15 cm & 1.5° 初值组合相应的 J 明显大于其他 4 组, 并且 θ_{yaw} 的结果与其他 4 组有较大偏差, 说明此组标定可能得到比较差的局部最优解。2 cm & 0.2° 初值组合对应的 J 值最小, 说明其得到的标定结果较其他初值更为可靠。

在初始迭代中心和初始步长相同的条件下, 多步数标定后目标函数值均小于各自对应的单步数标定目标函数, 说明多步数迭代比单步数迭代更容易得到更优的标定结果。但是, 多步数迭代标定消耗的时间较单步数更长。标定消耗时间随着步数的增加而快速增加。比如, 当步数为 15 时, 标定时间将在几百分钟以上, 这显然不是很好的选择。实际标定中, 在对时间要求不高的条件下, 可以考虑采用多步数迭代进行标定, 通常选择步数为 2~5。

3.2.2 较差初始迭代中心的标定实验

为验证算法的可靠性, 采用 2 号标定场景中的数据, 设定较差初始迭代中心。实验结果进一步说明在初始迭代中心和初始步长相同的条件下, 多步数迭代较单步数迭代更容易得到更优外参数。设定较差初始迭代中心 $y=x=0$ cm, $\theta_{yaw}=\theta_{pitch}=\theta_{roll}=0^\circ$, 初始角度步长为 5° , 初始位置步长为 20 cm。分别设定步数为 1 和 5 进行标定实验, 迭代过程中各参数的变化过程如图 5 所示。

图 5 为 2 号标定场景中 x 、 y 、 θ_{yaw} 以及 J 随迭代次数的变化情况。该平台上三维激光雷达安装的 θ_{pitch} 和 θ_{roll} 均很小, 其迭代结果未反映在图 5 中。当步数为 5 时, x 和 y 很快到达最优位置附近, 逐渐细化, 直到最优; θ_{yaw} 刚开始偏离初始位置较大,

通过迭代偏差逐渐减小, 并逐渐收敛到最优位置。当步数为 1 时, x 逐步渐进式到达最优位置; y 和 θ_{yaw} 在初始位置附近陷入了局部最优, 未能到达正确位置。图 5(d) 中步数为 5 时的 J 值总体小于步数为 1 时的 J 值, 说明点云对经过多步数迭代得到位姿变化后, 点云匹配程度更高、结果更准确。参照图 6 所示的目标函数等高线图, 形象地展示了外参数最优位置处目标函数最小。

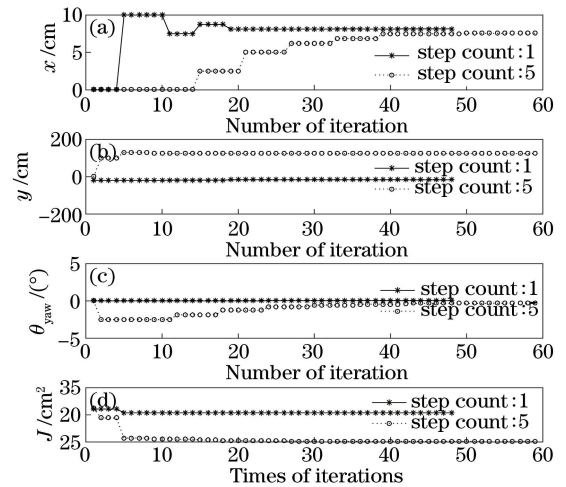


图 5 2 号标定场景中几个主要外参数及目标函数随迭代次数的变化情况。(a) x ; (b) y ; (c) θ_{yaw} ; (d) J
Fig. 5 Variation of several main extrinsic parameters and objective function with the number of iterations in calibration scene 2. (a) x ; (b) y ; (c) θ_{yaw} ; (d) J

图 6(a) 为根据初始设定的 $(-100, 100) \times (-100, 100)$ 范围内, 间隔 20 cm 的 x 和 y 的 121 个组合位置相应的目标函数值生成的等高线图。图中红色圆圈处表示位置组合 $(0, 100)$ 附近目标函数值最小, 将其确定为下一步的迭代中心, 计算以 $(0, 100)$ 为参数迭代中心时的 121 个位置参数组合, 如图 6(b) 中黑色圆圈所示。根据目标函数值生成第 2 个等高线图如图 6(c) 所示。图 6(c) 区域内 $(0, 120)$

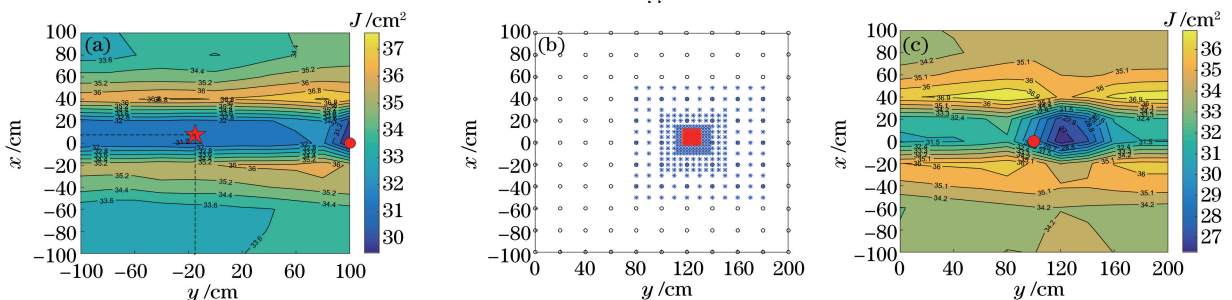


图 6 2 号标定场景迭代过程图。(a) 初始范围; (b) 迭代过程点; (c) 迭代中心移动后范围

Fig. 6 Iteration process diagrams in calibration scene 2. (a) Initial range; (b) points of the iteration process;

(c) range after moving the iteration center

目标函数值最小,将其确定为下一步的迭代中心继续迭代。迭代过程点如图 6(b)所示,每个点表示迭代过程中的一个位置组合点,逐渐缩小范围,直至满足终止条件。旋转参数迭代过程与之类似,此处不再赘述。

表 2 为 2 号标定场景中步数分别为 1 和 5 时的标定结果。综合分析图 6 与表 2 可得,相同标定环

表 2 2 号标定场景的标定结果

Table 2 Calibration results in calibration scene 2

Calibration	x / cm	y / cm	$\theta_{\text{yaw}} / (^{\circ})$	$\theta_{\text{pitch}} / (^{\circ})$	$\theta_{\text{roll}} / (^{\circ})$	J / cm^2
Before calibration	0	0	0	0	0	31.223
After calibration ($n=1$)	8.154	-16.826	0.0305	-0.021	0.016	30.363
After calibration ($n=5$)	7.578	123.945	-0.5070	0.071	-0.081	25.339

图 7 为两个标定场景外参数标定后三维激光雷达点云叠加效果图。对比图 4 所示标定前的两个三维场景可以明显看出,通过所提方法的标定,基本实

现了三维激光雷达与 GPS/INS 组合导航系统之间的外参数标定。步数为 5 时迭代生成的外参数最终的目标函数值明显小于步数为 1 时得到的目标函数值。步长为 1 时得到的相对位置为 (8.154296, -16.82617), 参照图 5(a), 对应于其中红色五角星所示位置, 可明显看出其位置并非整个区域的最优位置。可见, 对于设定的较差参数初值, 步数为 5 比步数为 1 更容易得到较优外参数。

现了三维激光雷达与 GPS/INS 组合导航系统之间的外参数标定。

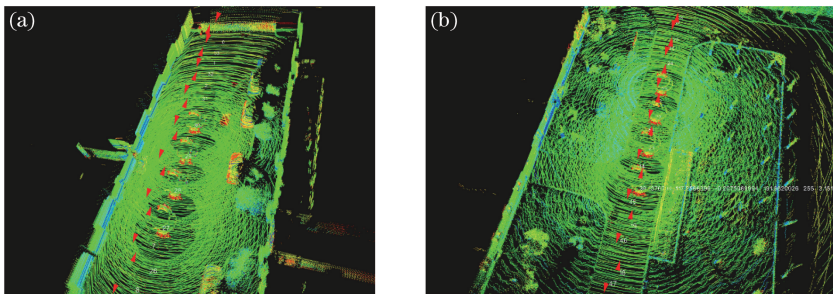


图 7 标定后两个场景的点云叠加图。(a) 1 号标定场景; (b) 2 号标定场景

Fig. 7 Two scene point cloud overlay maps after calibration. (a) Calibration scene 1; (b) calibration scene 2

3.2.3 不同初始迭代中心标定实验

基于 2 号标定场景,根据第 3.2.1 节中预估的参数迭代中心,在该初始中心位置参数的 $\pm 40 \text{ cm}$ 、旋转参数的 $\pm 4^{\circ}$ 范围内随机生成标定迭代中心,设定步长为 20 cm、为 3 进行标定实验。随机进行 20 次实验,得到 20 组标定结果,统计每个参数的均值和

均方差,结果如表 3 所示。

由表 3 可见,各个参数的均方差均比较小,可知不同标定初始迭代中心得到的标定结果偏差非常小。据此可以说明,多步数迭代对初始迭代中心的依赖性降低,更容易得到较优的外参数值。

表 3 不同初始迭代中心标定结果的均值与方差

Table 3 Mean value and standard deviation of calibration results for different initial iteration centers

Item	mean	standard	x / cm	y / cm	$\theta_{\text{yaw}} / (^{\circ})$	$\theta_{\text{pitch}} / (^{\circ})$	$\theta_{\text{roll}} / (^{\circ})$
Mean value			7.5840	124.1520	-0.4980	0.0910	-0.0900
Standard deviation			0.4536	0.6364	0.0075	0.0049	0.0037

4 结 论

提出了一种利用车辆直线往返行驶的三维激光雷达和 GPS/INS 组合导航系统数据,选择距离相近、方向相反的点云组成点云对,基于连续多对点云同时匹配,遍历多步数参数区域迭代获得外参数的方法。该方法无需采集车辆转弯时的数据进行标定(车辆转弯时,雷达点云需要转弯修正,修正误差会

影响标定结果),数据处理相对简单,减少了标定前的中间环节;设定了更为简单的目标函数,计算量小,标定时间缩短;迭代采用多步数参数区域,比单步数参数区域更容易得到更优的外参数。但标定结果的影响因素较多,如差分数据的精度及三维激光雷达数据与 GPS/INS 组合导航系统时间同步的精度等系统误差都会对标定结果产生影响,匹配的精度对环境也具有一定依赖性。所以,为提高标定的

准确度,标定时尽量选择结构规整、差分信号稳定的环境进行标定。本研究未能建立通用的评判标定精度的定量指标,建立一种通用的不同标定方法标定精度的评价指标将是后续的研究工作,目前只是通过目标函数值定性反映标定结果,为实际应用提供了一种改进方法。因为车辆运动近似平面运动,标定过程中没有考虑高度参数,下一步将考虑采集往返同一坡道的数据进行包含高度参数的标定。

参 考 文 献

- [1] Zhu Z, Liu J L. Unsupervised extrinsic parameters calibration for multi-beam LIDARs [J]. Proceedings of the 2nd International Conference on Computer Science and Electronics Engineering, 2013: 1110-1113.
- [2] Underwood J, Hill A, Scheduling S. Calibration of range sensor pose on mobile platforms [C]. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2007: 3866-3871.
- [3] Luo Z F, Zhang K, Wang Z G, *et al.* Pose calibration of laser ranger finder in automated guided vehicle [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(6): 062802.
- 罗志锋, 张轲, 王志刚, 等. 激光测距传感器在自主导航小车中的位置标定 [J]. 激光与光电子学进展,

2017, 54(6): 062802.

- [4] Levinson J, Thrun S. Unsupervised calibration for multi-beam lasers [M]. Heidelberg: Springer, 2014: 179-193.
- [5] Noura 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] Xie D S, Xu Y C, Wan J, *et al.* Trajectory tracking control of wheeled mobile robots based on RTK-GPS [J]. Robot, 2017, 39(2): 221-229.
- 谢德胜, 徐友春, 万剑, 等. 基于 RTK-GPS 的轮式移动机器人轨迹跟随控制 [J]. 机器人, 2017, 39(2): 221-229.
- [7] Karney C F F. Algorithms for geodesics [J]. Journal of Geodesy, 2013, 87(1): 43-55.
- [8] Liu J, Zhang X, Zhu J W, ICP three-dimensional point cloud registration based on K-D tree optimization [J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2016, 25(6): 15-18.
- 刘江, 张旭, 朱继文. 一种基于 K-D 树优化的 ICP 三维点云配准方法 [J]. 测绘工程, 2016, 25(6): 15-18.
- [9] Segal A, Haehnel D, Thrun S. Generalized-ICP [C]. Proceedings of Robotics: Science and Systems, 2009: 26-27.