



基于手眼模型的三维激光雷达外参数标定

韩栋斌*, 徐友春, 李 华, 谢德胜, 陈 文

军事交通学院, 天津 300161



摘要: 无人车三维激光雷达与 GPS/INS 组合导航系统融合使用, 需要对两者之间的相对位姿进行标定。针对车辆运动过程点云畸变的现象, 提出了一种单帧点云中激光扫描点坐标修正方法。针对标定问题, 建立了标定模型, 提出了一种基于 ICP 算法和手眼标定模型及最小二乘法进行外参数标定的方法。通过蒙特卡罗仿真实验, 对该方法的有效性和精度进行了仿真和验证。在实验室 JJUV-6 无人车平台上进行标定试验, 得到两者之间的三维位姿关系。对比标定前后三维点云重建效果, 点云重叠度接近于配准效果。基于应用的目的, 基本满足二维地图构建和三维环境重建的需求。
关键词: 无人车; 三维激光雷达; 点云配准; 手眼模型; 外参数标定

中图分类号: TN958.98

文献标志码: A

Calibration of extrinsic parameters for three-dimensional lidar based on hand-eye model

Dongbin Han*, Youchun Xu, Hua Li, Desheng Xie and Wen Chen

Military Transportation University, Tianjin 300161, China

Abstract: It is necessary to calibrate the relative pose between the three-dimensional (3D) lidar and the GPS / INS integrated navigation system for their combination. Because of the phenomenon of point cloud distortion in vehicle moving process, a method of coordinate correction for laser scanning point in single frame point cloud is proposed. Aiming at the calibration problem, a method of extrinsic parameter calibration is proposed, based on ICP algorithm, hand-eye calibration model, and least squares method. Monte Carlo simulation results show that the algorithm is accurate and effective. The calibration experiment is carried out on the unmanned vehicle laboratory JJUV-6, and the 3D relative pose relations are obtained. It shows that after calibration the effect of 3D point clouds reconstruction is better, and the overlapping degree of point clouds is close to the registration effect. For the purpose of applications, it can meet the needs of 2D map construction and 3D environment reconstruction.

Keywords: unmanned vehicle; three-dimensional lidars; point cloud registration; hand-eye model; extrinsic parameters calibration

DOI: 10.3969/j.issn.1003-501X.2017.08.006

Citation: *Opto-Elec Eng*, 2017, 44(8): 798-804

1 引 言

三维激光雷达凭借其室外环境适应性好、视野广、

精度高、频率高等优点成为无人车自动驾驶、建图、定位等方面不可代替的传感器。激光雷达通过扫描无人车周围环境为无人车提供三维环境点云信息; GPS/INS 组合系统提供车辆位姿信息; 两者相互补充, 为无人车通过自身传感器获取准确地理环境数据提供充分条件, 也为即时建图与定位(SLAM)提供了可行性。

收稿日期: 2017-05-22; 收到修改稿日期: 2017-07-04

*E-mail: hanjalison@126.com

本文在三维激光雷达内部参数标定准确的前提下,求解三维激光雷达与 GPS/INS 组合导航系统之间相对位姿关系。通常的标定方法是利用人工经验通过简单的目测和手工测量等进行粗略标定,不能得到精确的标定效果。并且,激光雷达和 GPS/INS 组合导航系统之间的相对转角关系不能直接通过测量得到。所以,需要通过算法实现两者之间的标定。

针对三维激光雷达外参数标定问题,国防科技大学程金龙等^[1]提出了一种采用三面靶标的激光雷达外参数标定方法,对靶标进行三维重建,利用随机采样一致性(RANSAC)算法进行平面分割和同名向量的提取,采用坐标系转换模型对标定参数求解,实现了激光雷达外参数的标定,主要解决多激光雷达的标定问题;Zhu 等^[2]提出了一种无监督三维激光雷达外参数标定方法,该方法简单有效,但依赖于平面和柱状特征,对环境要求高,基准坐标系并非 GPS/INS 组合导航系统坐标系,且只能得到雷达相对地面的高度;Underwood 等^[3]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,该方法依赖特殊标定物;Levinson 等^[4]提出了一种利用 64 线激光雷达中多个单激光束多帧点云叠加的三维环境配准的方法,通过建立目标能量方程,迭代得到外参数,该方法计算量大,效率低,并且对初值比较敏感,容易陷入局部最优解,算法耗时也较长;Nouira 等^[5]提出了一种基于平面特征的无监督外参数优化方法,改进了优化方向性,提出了标定结果定量评价指标,并与 Levinson 的方法进行了对比,标定效果和速度都有明显改善。

据此,本文提出了一种基于 ICP 算法和手眼标定模型的三维激光雷达外参数标定方法。选取车身姿态角发生变化的点云对,通过 ICP 算法得到配准后新的位姿,利用配准前后的位姿变化,根据手眼标定模型得到三维激光雷达的外参数。

2 标定数据准备

2.1 实验平台

如图 1 所示,三维激光雷达坐标系原点建立在三维激光雷达虚拟中心点,三维激光雷达旋转角 0° 方向为 Z 轴, 90° 方向为 X 轴,根据左手定则得出 Y 轴;惯性组合导航系统中实时获取到的 GPS 经纬度为 GPS 天线的位置,姿态角为惯导输出的姿态角。由于 GPS 天线与惯导都固连在车体上,同属一个刚体,具有相同的姿态角。所以,本文建立的 GPS/INS 组合导航系

统坐标系以 GPS 天线位置为原点,惯导设备安装正方向朝向为 Z 轴正方向,车的右方为 X 轴正方向,根据左手法则,得到 Y 轴方向。标定的目的是获得两坐标系之间的平移和旋转关系。由此,可以根据实时的 GPS/INS 组合导航系统的位姿计算得到三维激光雷达点云的位姿,以提高三维重建的精度。

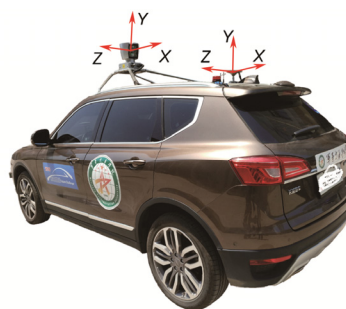


图 1 JJUV-6 无人车实验平台。

Fig. 1 Experimental platform of JJUV-6 unmanned vehicle.

2.2 数据解析

两个传感器数据融合前需要将两者数据进行时间同步。设定 Velodyne HDL-64E 三维激光雷达旋转周期为 100 ms, GPS/INS 组合导航系统数据周期为 10 ms。定义三维激光雷达旋转一周获得的点云为单帧点云,根据三维激光雷达数据包中旋转角度信息,将三维激光雷达数据分割成单帧数据存储。同时,存储 GPS/INS 组合导航系统位姿数据。每帧点云数据对应 10 个位姿数据。数据同步误差小于 10 ms,基本满足时间同步要求。根据三维激光雷达每个激光束的内参数及雷达数据包中旋转角和距离数据将雷达数据解析成三维点云坐标^[6]。

2.3 单帧点云中点的坐标修正

2.2 节解析得到的坐标值为激光扫描点相对于其激光发射时刻三维激光雷达坐标系原点的坐标。相对于地球坐标系,车辆在运动过程中,三维激光雷达坐标系随着车辆运动而运动。车辆直线运动时,三维激光雷达坐标系只存在平移运动;车辆转弯运动时,三维激光雷达坐标系除了随着车辆发生位置变化外,还有车辆转弯导致的三维激光雷达坐标系的转动。车辆运动速度或者姿态角变化速度不同,其对点云影响程度不同。车辆运动速度越快或者姿态角变化速度越快,点云的错偏程度越大。因此需要实现运动中单帧点云中激光扫描点坐标修正。

由于车辆运动近似平行于路面, 本文校准没有考虑高度方向偏移。图 2 为车辆转弯时雷达坐标系移动示意图。假设采集一帧点云的第一包数据编号为 $i=0$, 位姿如图 2 中的 P_0-XZ 。数据包编号 i 依次递增, 相应时刻位姿如图 2 中的 P_i-XZ 。三维激光雷达数据以 UDP 数据包形式发出, 每个数据包时间 t_p 为 288 μs , 每包数据各点对应发射时刻为 t_k , 航向角 θ 的变化率为 ω , 车辆运动时在正东方向的速度分量为 v_{Ex} , 在正北方向的速度分量为 v_{Nz} , 由运动学理论得到:

$$\begin{cases} x_E = [t_p \times (i-1) - t_k] \times v_{Ex} \\ z_N = [t_p \times (i-1) - t_k] \times v_{Nz}; \\ \Delta\theta = [t_p \times (i-1) - t_k] \times \omega \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} ax = x_E \cos \theta + z_N \sin \theta \\ ay = z_N \cos \theta - x_E \sin \theta \\ px = px_0 \cos \Delta\theta + pz_0 \sin \Delta\theta + ax \\ pz = pz_0 \cos \Delta\theta - px_0 \sin \Delta\theta + az \end{cases}, \quad (2)$$

式中: x_E 、 z_N 、 $\Delta\theta$ 分别为每帧点云中每个点相对于每帧点云起始时刻车辆位置在正东方向和正北方向的变化量, 以及航向角的变化量。 (px_0, pz_0) 为校准前点的坐标, (px, pz) 为校准后点的坐标。由此可以得到每帧点云中的点相对于帧点云初始时刻车辆姿态的坐标。

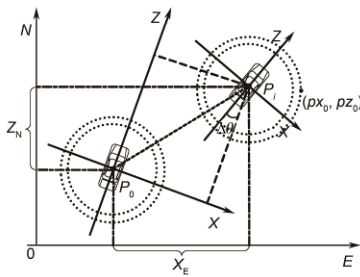


图 2 点云坐标修正图.

Fig. 2 Correction chart of the point cloud coordinate.

2.4 选取点对

根据每帧点云对应的车辆位姿数据, 选择角度变化范围为 $10^\circ \sim 50^\circ$ 的两帧点云组成一对点云对。从采集的数据中选择多对满足条件的点云对。GPS/INS 组合导航系统返回经纬度数据, 为便于计算, 将其转换到平面直角坐标系下。根据经纬度转换平面坐标的关系^[7-8], 将每帧点云对应的车辆的位姿转换到平面坐标系, 得到两者之间的相对位姿关系。

3 标定方法

3.1 标定模型

图 3 所示为车辆标定模型建立过程的示意图。图 3(a) 为全局坐标系下车辆在不同时刻的真实位置及相应时刻的三维激光雷达扫描的真实环境表示, 图中真实环境通过两个不同位置的特征物表示。两个传感器采集的数据只有三维激光雷达点云和 GPS/INS 组合导航系统的位姿信息, 只能得到 GPS/INS 组合导航系统在平面坐标系下的坐标。三维激光雷达坐标系和 GPS/INS 组合导航系统坐标系关系未知, 所以三维激光雷达在平面坐标系下的真实位姿未知, 不能按照三维激光雷达的位姿叠加三维激光雷达点云, 不能直接根据现有信息得到图 3(a) 中的情形; 只能如图 3(b) 所示, 将两帧激光雷达点云以各自对应的 GPS/INS 组合导航系统输出的车辆在平面坐标系下的位姿信息 A 和 B 投影到平面坐标系, 蓝色场景和红色场景分别表示 A 位置和 B 位置三维激光雷达表示的三维环境。可以看出, 三维环境中的特征物 1 和 2 既存在平移偏移又存在旋转偏移, 不能实现三维环境的复现; 图 3(c) 中以 B 位置点云为基准, 采用基于 KD-tree 加速的 ICP 算法对 A 位置对应的点云进行配准, 实现三维环境中特征物的匹配, 得

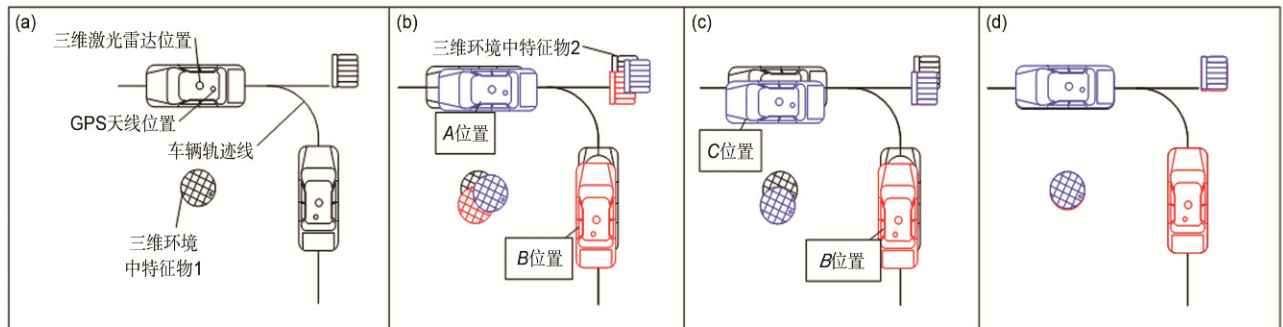


图 3 标定模型的过程示意图.

Fig. 3 Schematic diagram of calibration model.

到新的位姿 C 。将图 3(c)中的两帧点云进行相同的变换可以得到图 3(d)的情形,与图 3(a)中完全相同,实现真实的三维环境复现,该变换实际上就是雷达坐标系和 GPS/INS 组合导航系统坐标系的转换关系。

根据图 3(b)~图 3(d),假设激光雷达坐标系和组合导航系统坐标系存在空间变换关系 P ,车辆在 A 、 B 、 C 位置时, GPS/INS 组合导航系统坐标系相对于平面坐标系的转移关系分别为 P_A 、 P_B 和 P_C ,根据以上模型建立过程可以得到:

$$P^{-1} \cdot P_B^{-1} \cdot P_A \cdot P \cdot X = P_B^{-1} \cdot P_C \cdot X, \quad (3)$$

式中: X 表示雷达点云相对于雷达坐标系的坐标,形

$$\text{式为 } X = \begin{pmatrix} x_0 & y_0 & z_0 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_i & y_i & z_i & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & z_n & 1 \end{pmatrix}^T, \quad n \text{ 为点云点的数量,}$$

$i=1,2,\dots,n$; P 为雷达坐标系到组合导航系统坐标系的转换矩阵,其形式为 $P = \begin{bmatrix} R & t \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$,其中 R 为 3×3 的旋转矩阵, t 为 3×1 的平移向量; P_A 、 P_B 、 P_C 分别为车辆在 A 、 B 、 C 位置时组合导航系统坐标系到平面坐标系的转换矩阵。

化简式(3)可以得到:

$$P_B^{-1} \cdot P_A \cdot P = P \cdot P_B^{-1} \cdot P_C, \quad (4)$$

这里,令 $\begin{cases} P_M = P_B^{-1} \cdot P_A \\ P_N = P_B^{-1} \cdot P_C \end{cases}$,式(4)可以转化为

$$P_M \cdot P = P \cdot P_N. \quad (5)$$

根据 $P = \begin{bmatrix} R & t \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ 形式,将式(5)拆分,可得:

$$R_M \cdot R = R \cdot R_N, \quad (6)$$

$$R_M \cdot t + t_M = R \cdot t_N + t. \quad (7)$$

式(5)和式(6)满足 $AX = XB$ 形式的手眼标定模型,可依据手眼标定模型来求解。

3.2 基于 ICP 算法的点云配准

图 3(b)~图 3(c)过程所示两帧激光雷达点云的配准采用基于 K-D 树加速的 ICP 算法^[9]。ICP 算法在精细配准方面具有优良表现。但对初始位置有依赖性。较差的初始位置,容易导致配准得到局部最优解。本文选择的点云对的位姿都是在差分 GPS 信号良好的条件下采集的,保证了每帧点云精确的位姿,也为配准

提供较好的初始位置,为标定提供了良好的前提。

ICP 算法主要包括以下两个步骤。1) 搜索两个扫描点云的对应点集对。实际应用中,点云中点的数量庞大,通常需要对点云进行降采样以提高配准速度。以两帧点云中其中一帧点云为基准,在另一帧点云中搜索与之匹配的最近点,构成点集对。判断两对应点之间的距离是否小于阈值 $d_{\max}$,距离较大,系数设置为 0。基于 K-D 树加速最近点搜索的 ICP 算法的两大特点在于其简洁性和快速性。2) 计算对应集点对间距离最小时对应的转移矩阵。迭代重复这两个步骤通常会收敛到期望的转移矩阵。

3.3 手眼标定求解算法

转移矩阵 P 的求解需要满足“非平行”条件。

“非平行”条件是指用于求解的多个方程对应的车辆的运动空间旋转轴不能全部平行或者近似平行,否则会导致待求解方程组的系数矩阵不满秩或者条件系数过大,导致无法求得唯一解或者求解结果不准确^[10]。

由于车辆的运动比较特殊,几乎总是平行于地面运动,受其运动空间和姿态的限制,通常采集数据只包括车辆在平面转弯的数据,就会出现空间旋转轴接近平行的情形,不满足“非平行”条件。此时,可以采用刘佳君等^[10]基于欠驱动爬壁机器人标定问题提出的平面约束手眼标定方法进行二维求解。

为了得到激光雷达和 GPS/INS 组合导航系统之间的 6 个自由度的位姿关系,在实验过程中采集上下坡的数据,与平面上转弯运动数据一起构成了车辆运动“非平行”条件,根据 Tsai 等^[11]提出的方法求解三维激光雷达外参数。求解过程通过两步完成。根据多组点云对位姿关系列出的式(6)构成超定方程组,通过最小二乘法来求解旋转矩阵 R ;将所求得的旋转矩阵作为已知,构建式(7)超定方程组,同样通过最小二乘法来求解平移向量 t 。

4 实验与结果

4.1 仿真实验

设定三维激光雷达坐标系和 GPS/INS 组合导航系统坐标系间的转移矩阵 P 已知,选择采集的部分点云对进行仿真。以其中一帧点云位姿为基准,通过式(4)计算另一帧点云配准后的精确位姿 P_C 。然后对 P_C 加入不同的噪声偏差量,求解 P 。

在 Matlab 平台, 以实际选取的 15 对转弯点云对 $P_1 \sim P_{15}$ 和 15 对上下坡点云对 $P_{16} \sim P_{30}$ 进行仿真, 设定旋转矩阵 R 为单位矩阵, 计算理论配准后的点云位姿; 同时对计算得到的理论航向角、俯仰角、横滚角添加噪声 $\varepsilon \sim u(-a, a)$, a 依次为 $\{0^\circ, 0.01^\circ, 0.02^\circ, \dots, 0.99^\circ, 1^\circ\}$, 根据式(6)进行旋转矩阵的求解。得到旋转矩阵后, 将其转换为欧拉角形式表示。进行 800 次蒙特卡罗实验, 分别统计俯仰角、航向角、横滚角三个角度值与设定真实值之间的偏移量的期望和标准差, 结果如图 4 和图 5 所示。

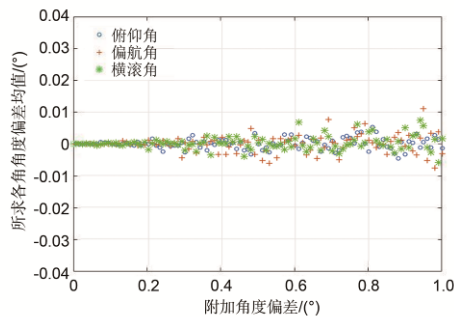


图 4 附加角度偏差对所求角度偏差均值的影响。

Fig. 4 Effect of the additional angular deviation on the mean of the angular deviation.

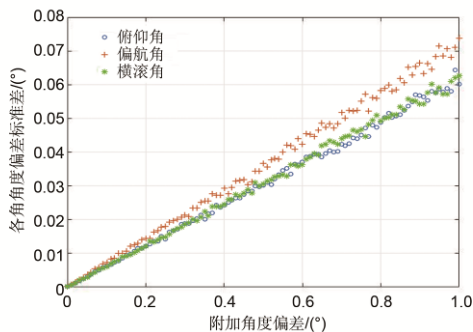


图 5 附加角度偏差对所求角度偏差标准差的影响。

Fig. 5 Effect of the additional angular deviation on the standard deviation of the angular deviation.

同时对配准后俯仰角、航向角、横滚角附加不同偏差值, 得到其对三个旋转角度偏差均值和标准差的影响, 如图 4 和图 5 所示。由图 4 中可以看出, 所求角度偏差的均值在 0 附近, 但有随着附加偏差的增大而增大的趋势。图 5 中标准差和所附加的角度偏差呈正相关。实际配准所带来的角度误差在非局部最优的条件下, 通常小于 0.2° , 其计算所得各角的偏差均值几乎为 0° , 标准差在 0.015° 以内, 基本可以满足标定要求。

三维激光雷达和组合导航系统之间的转换关系是通过旋转矩阵和平移向量解耦进行求解的, 先进行旋

转矩阵的求解, 而后进行平移向量的求解。姿态角数据通过转换为四元数来求解旋转矩阵, 旋转矩阵的结果, 也将对平移向量的求解结果产生影响。

旋转矩阵 R 仿真完成后, 将旋转矩阵求解误差对平移向量的影响进行仿真。根据上述点云对, 计算理论配准后的点云位姿; 同时对旋转矩阵 R 对应的航向角、俯仰角、横滚角添加噪声 $\varepsilon \sim u(-a, a)$, a 依次为 $\{0^\circ, 0.01^\circ, 0.02^\circ, \dots, 0.99^\circ, 1^\circ\}$, 根据式(7)进行平移向量求解。进行 800 次蒙特卡罗实验, 分别统计不同偏差下, 计算所得 x 、 y 、 z 与设定真实值之间的偏移量均值和标准差, 结果如图 6 和图 7 所示。

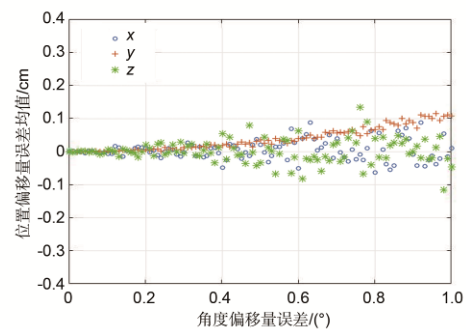


图 6 所求旋转角度偏差量对所求位置偏差均值的影响。

Fig. 6 Effect of the rotation angular deviation on the mean of the positional deviation.

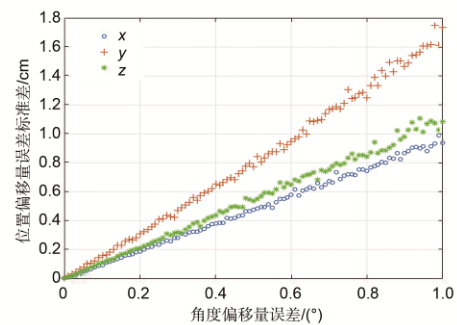


图 7 所求旋转角度偏差量对所求位置偏差标准差的影响。

Fig. 7 Effect of the rotation angular deviation on the standard deviation of the positional deviation.

图 6 和图 7 为所求旋转角度偏差对所求平移向量的影响, 没有考虑配准位置误差直接对所求平移向量的影响。结合图 4 和图 5, 依据 3σ 理论, 其角度偏差有 99% 的概率落在 $[-0.045^\circ, 0.045^\circ]$ 之间。根据图 6 和图 7 可以看出, 当角度偏差在 $[-0.045^\circ, 0.045^\circ]$ 之间, 其对位置偏移量 t 造成的偏差均值几乎为 0, 偏差标准差小于 0.1 cm。依据 3σ 理论, 其角度偏差对位置偏移量造成的影响有 99% 的概率落在 $[-0.3 \text{ cm}, 0.3 \text{ cm}]$ 之间。可见, 较小的旋转矩阵求解偏差不会对偏移量求解造成

太大影响,基本满足标定要求。

仿真实验实现了三维激光雷达和 GPS/INS 组合导航系统相对位姿的标定,对方法的有效性和精度进行了评估。在实验数据及配准结果准确的情况下,可以得到较高精度的标定效果,在存在一定误差的条件下,标定误差仍保持在较低水平,满足标定要求。

4.2 实车试验

实验平台为 JJUV-6 无人车平台,平台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置和姿态信息,姿态精度可达 0.02° ;位置单点定位精度小于 2 m (CEP);RTK 精度可达 $2\text{ cm} + 1 \times 10^{-6}$ (CEP)。平台顶部安装 Velodyne-64HDL 激光雷达,在 600 r/min 的转速下,每帧采集约 13 万个点,精度可达厘米级。软件部分通过 C++ 编写,主要集成 PCL、boost 等库,用于点云显示和配准。

为得到六自由度的相对位姿转换关系,分别采集 6 组左转弯、右转弯、上坡、下坡的激光雷达点云对和相应的位姿数据,部分点云对如图 8 所示。图 8 中红色箭头表示点云的位姿,路红线表示采集的车辆轨迹。通过 ICP 算法配准,得到每对点云配准后的新位姿数据 P_c 。

根据经典手眼标定模型,综合所有点云对配准前后的位姿数据,计算得到三维激光雷达坐标系和 GPS/INS 组合导航系统坐标系之间的转移矩阵式(8)。

$$P = \begin{bmatrix} 0.999957215041105 & -0.000061086522442 & -0.009250100306154 & 0 \\ 0.000059146571161 & 0.999999976201764 & -0.000209995605077 & 0 \\ 0.009250112913919 & 0.000209439508708 & 0.999957194856946 & 0 \\ -0.056256416954231 & 0.263514526544362 & 1.412562451325845 & 1 \end{bmatrix}^T \quad (8)$$

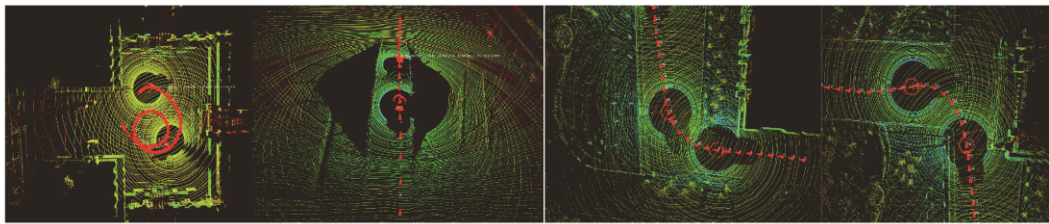


图 8 部分采集场景的点云对。

Fig. 8 Point cloud pairs in the partial acquisition scenes.

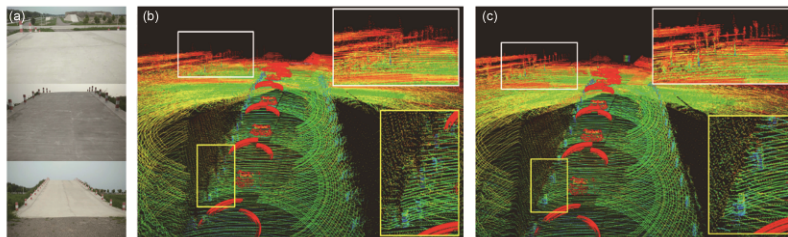


图 9 车辆上坡时三维重建效果标定前后对比。(a) 标定环境图。(b) 标定前点云图。(c) 标定后点云图。

Fig. 9 Comparison of 3-dimensional reconstruction results before and after calibration on the slope. (a) The environment map. (b) The map of the point cloud before calibration. (c) The map of the point cloud after calibration.

根据 $P = \begin{bmatrix} R & t \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, 可以得到标定后的旋转矩阵

$$R = \begin{bmatrix} 0.9999572 & -0.0000611 & -0.0092501 \\ 0.0000591 & 0.9999999 & -0.0002100 \\ 0.0092501 & 0.0002094 & 0.9999572 \end{bmatrix}^T \text{ 和平移向}$$

量 $t = [-0.056, 0.264, 1.407]^T$ 。根据旋转矩阵转换欧拉角关系式,计算得到三维激光雷达和 GPS/INS 组合导航系统之间的相对位置关系,偏航角偏差为 0.5302° ,俯仰角为 -0.0121° ,横滚角为 0.0035° 。

根据以上求得的三维激光雷达外参数关系,可以根据车辆 GPS/INS 组合系统实时获得的位姿数据求得雷达在大地坐标系下的位姿,将同样的三维点云根据标定前后的位姿投影到三维空间,进行三维重建,效果如图 9 和图 10 所示。

图 9 所示为车辆直线上坡三维重建场景,发生变化的角度主要是俯仰角,对比标定前后的两组图可以看出,图 9(b)图中坡道两侧的拦截柱有重影,不清晰,远处的树干非常模糊,几乎不能分辨;标定后图 9(c)中拦截柱和树干更加清晰。图 10 为车辆转弯时三维雷达点云三维重建校准前后对比图,图中红色箭头表示车辆的行驶轨迹。可以看出,车辆进行了急转弯,图 10(c)中三维重建效果明显优于图 10(b),在未配准的条件下,基本实现较好的三维环境重建。

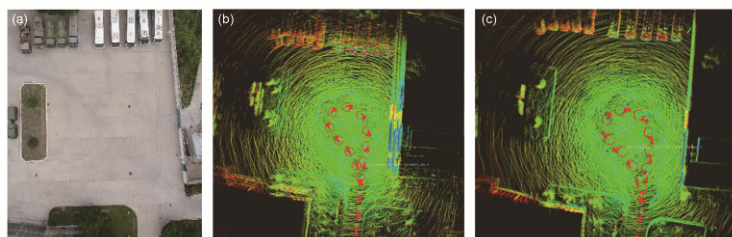


图 10 部车辆转弯时三维重建效果标定前后对比图. (a) 标定环境图. (b) 标定前点云图. (c) 标定后点云图.

Fig. 10 Comparison of 3-dimensional reconstruction result before and after calibration at the corner. (a) The environment map. (b) The map of the point cloud before calibration. (c) The map of the point cloud after calibration.

5 结 论

对无人车三维激光雷达和 GPS/INS 组合导航系统相对位姿标定进行了研究.提出了一种基于 ICP 算法、手眼标定模型及最小二乘法求解外参数的标定模型.该标定方法无需设置特殊标定物,无需人工测量,是一种无监督标定方法.仿真实验验证了该方法的有效性.通过实车试验,标定得到了三维激光雷达和 GPS/INS 组合导航系统之间的三维位姿关系.对比标定前后三维重建效果图,验证了其标定效果.但该方法仍有一些不足之处,比如,手眼标定模型的求解数据需要满足“非平行”条件,实际标定过程中,不容易同时找到转弯和上坡的环境来满足求解条件.同时,对于有明确评价标定效果的定量指标的确立,这也将是后续研究内容.

基金项目

国家自然科学基金重大项目(91220301);国家重大研发计划(2016YFB0100903)。

参考文献

- Cheng Jinlong, Feng Ying, Cao Yu, *et al.* Extrinsic calibration method for multiple lidars mounted on mobile vehicle[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2013, **40**(12): 89–94.
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.
- Zhu Z, Liu J. Unsupervised extrinsic parameters calibration for multi-beam LIDARs[C]// *Proceedings of the 2nd International Conference on Computer Science and Electronics*, Paris: Atlantis Press, 2013.
- Underwood J, Hill A, Scheduling S. Calibration of range sensor pose on mobile platforms[C]// *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2007: 3866–3871.
- Levinson J, Thrun S. Unsupervised calibration for multi-beam lasers[M]// Khatib O, Kumar V, Sukhatme G. *Experimental Robotics. Springer Tracts in Advanced Robotics*, Berlin: Springer Press, 2014, **79**: 179–193.
- Nouira H, Deschaud J E, Goulette F. Target-free extrinsic calibration of a mobile multi-beam LIDAR system[J]. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2015, II-3/W5: 97–104.
- User's manual and programming guide. HDL-64E S3: High definition LiDAR sensor[EB/OL]. [2017-05-20]. http://velodynelidar.com/docs/manuals/63-HDL64ES3%20REV%20J%20MANUAL_USERS%20AND%20PROGRAM%20GUIDE_HDL-64E%20S3.pdf
- Xie Desheng, Xu Youchun, Wan Jian, *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踪控制[J]. *机器人*, 2017, **39**(2): 221–229.
- Karney C F F. Geodesics on an ellipsoid of revolution[C/OL]. Washington, USA: SRI International, [2016-12-28]. <https://geographiclib.sourceforge.io/geod.html>.
- Liu Jiang, Zhang Xu, Zhu Jiwen. 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.
- Liu Jiajun, Sun Zhenguo, Zhang Wenzeng, *et al.* Plane-constraint based hand-eye calibration method for underactuated wall-climbing robot[J]. *Robot*, 2015, **37**(3): 271–276, 285.
刘佳君, 孙振国, 张文增, 等. 基于平面约束的欠驱动爬壁机器人手眼标定方法[J]. *机器人*, 2015, **37**(3): 271–276, 285.
- Tsai R Y, Lenz R K. A new technique for fully autonomous and efficient 3D robotics hand/eye calibration[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1989, **5**(3): 345–358.