

单线和多线雷达标定技术研究

蒋祖武
上海宾通智能科技有限公司
DOI:10.32629/acair.v4i2.20410

[摘 要] 在AGV工程应用领域中,定位精度和多车一致性是衡量AGV能力的重要指标。而定位精度和多车一致性又非常依赖于AGV定位传感器的安装精度。因此,对AGV的制造和装配提出了很高的要求。本文就是通过研究雷达的标定技术,提供一套通用的标定方法,适用于单线和多线雷达,很好的解决了定位精度和多车一致性对于安装精度的依赖,很好的提升了AGV的定位精度和多车一致性。

[关键词] 标定; 定位精度; 多车一致性

中图分类号: TH161+.7 文献标识码: A

Sigle and Multi-line lidar calibration research

Zuwu Jiang

BITO Intelligence, Inc.

[Abstract] Positioning accuracy and multi-vehicles consistency are key points to measure AGV’s performance in the filed of AGV projects. Those two rely a lot on installation accuracy of positioning sensor like lidar. So manufacture and assembly of AGV are required to a higher level and it will cost more. In this paper, a common calibration method is used to solve the restrict to installation accuracy of lidar and it improves Positioning accuracy and multi-vehicles consistency of AGV by researching calibration on lidar.

[Key words] calibration; positioning accuracy; multi-vehicles consistency

引言

激光雷达通过扫描目标标定件,得到此标定件的点云数据,再通过匹配算法获得激光雷达的坐标位置,包括偏移距离,偏转角度等,最终确定激光雷达的安装精度。

标定技术^[1]系统组成如下图1所示,包括叉车1、激光雷达2和标定件3和其他辅助设备(C型夹,反光带等)。

与传统定位相比,通过激光雷达扫描位置精度高的标定件,获取目标点云,再匹配理论模型,获得激光雷达的位置信息。这种标定技术的优势体现在:

- (1) 精度高并且对AGV加工制造精度和装配误差要求低;
- (2) 可以消除人为操作的误差影响,保证了激光雷达安装位置的准确性;
- (3) 标定方法简单易用。

1 概述

标定技术的主要作用就是确定传感器激光雷达与AGV运动中心之间的相对位置关系。以叉车为例,如图2所示,坐标系 O_f-xyz 是叉车1的坐标系,原点是叉车运动中心; 坐标系 O_c-xyz 为标定件3的坐标系,原点是标定结构件3的几何中心; 坐标系 O_l-xyz 为传感器激光雷达2的坐标系,原点是传感器激光雷达2的几何中心。整个标定实现过程如下: 首先,将标定结构件3固定在叉车1的运动中心位置货叉上方,确保标定结构件的几何中心与叉车AGV的运动中心在水平地面上的投影相重合; 然后再调整标定结构件的高度,使得传感器激光雷达与标定结构件在同一高度,并记录标定件3上升的高度 h ; 然后,激光雷达2扫描标定件3,得到标定件3的点云数据

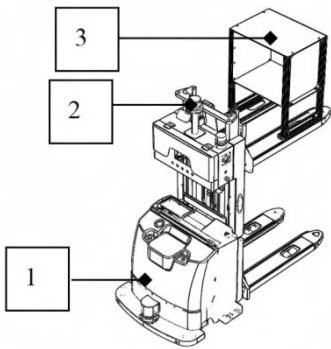


图1 标定系统示意图

$\{p_1, p_2, p_3 \cdots p_n\}$; 然后, 再通过数据处理与标定件3的理论

数据匹配, 获得两者间的转换关系; 最后, 通过坐标转换获得激光雷达2在叉车1坐标中的准确位置, 从而实现精确的标定。

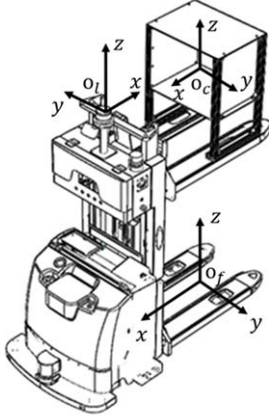


图2 标定坐标系

2 雷达标定技术

2.1 多线 (3D) 激光雷达标定

3D 激光雷达^[2]扫描标定件获得测量点云数据

$S = \{p_1, p_2, p_3, \dots, p_n\}$, 而标定件数模可提取理论点云数据

数据 $S' = \{\hat{p}_1, \hat{p}_2, \hat{p}_3, \dots, \hat{p}_n\}$ 。标定结构件测量点云数据所

在的坐标系是激光雷达坐标 $O_l - xyz$; 而标定结构件理论点

云数据所在的坐标系是标定结构件坐标 $O_c - xyz$ 。

标定的核心作用就是让测量的点云数据与理论点云数据相匹配, 匹配的方法就是让前后两者的残差值最小化, 残差数学模型如下:

$$E = \arg \min \sum_{i=1}^n \left\| \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} s_i - s'_i \right\|$$

$$\text{其中, } s_i = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} \text{ 和 } s'_i = \begin{bmatrix} x'_i \\ y'_i \\ z'_i \end{bmatrix}。$$

位姿矩阵为:

$$\begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_0 & T_0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta R_0 & \Delta T_0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_0 & T_0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} - H^{-1} \cdot J \cdot \Delta E$$

其中,

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial S}{\partial r_x} \\ \frac{\partial S}{\partial r_y} \\ \frac{\partial S}{\partial r_z} \\ \frac{\partial S}{\partial t_x} \\ \frac{\partial S}{\partial t_y} \\ \frac{\partial S}{\partial t_z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial S}{\partial x} \cdot \frac{\partial x}{\partial r_x} + \frac{\partial S}{\partial y} \cdot \frac{\partial y}{\partial r_x} + \frac{\partial S}{\partial z} \cdot \frac{\partial z}{\partial r_x} \\ \frac{\partial S}{\partial x} \cdot \frac{\partial x}{\partial r_y} + \frac{\partial S}{\partial y} \cdot \frac{\partial y}{\partial r_y} + \frac{\partial S}{\partial z} \cdot \frac{\partial z}{\partial r_y} \\ \frac{\partial S}{\partial x} \cdot \frac{\partial x}{\partial r_z} + \frac{\partial S}{\partial y} \cdot \frac{\partial y}{\partial r_z} + \frac{\partial S}{\partial z} \cdot \frac{\partial z}{\partial r_z} \\ \frac{\partial S}{\partial x} \cdot \frac{\partial x}{\partial t_x} + \frac{\partial S}{\partial y} \cdot \frac{\partial y}{\partial t_x} + \frac{\partial S}{\partial z} \cdot \frac{\partial z}{\partial t_x} \\ \frac{\partial S}{\partial x} \cdot \frac{\partial x}{\partial t_y} + \frac{\partial S}{\partial y} \cdot \frac{\partial y}{\partial t_y} + \frac{\partial S}{\partial z} \cdot \frac{\partial z}{\partial t_y} \\ \frac{\partial S}{\partial x} \cdot \frac{\partial x}{\partial t_z} + \frac{\partial S}{\partial y} \cdot \frac{\partial y}{\partial t_z} + \frac{\partial S}{\partial z} \cdot \frac{\partial z}{\partial t_z} \end{bmatrix}$$

经过多次迭代计算, 达到残差E最小, 以此来得到最优的位姿R、T。

2.2 单线 (2D) 激光雷达标定

2D 激光雷达扫描标定件获得测量点云数据

$S = \{p_1, p_2, p_3, \dots, p_n\}$, 形成3条线段ab、bc和cd。而标定

件数模可提取对应理论点云数据 $S' = \{\hat{p}_1, \hat{p}_2, \hat{p}_3, \dots, \hat{p}_n\}$,

形成3条线段AB、BC和CD, 如下图3所示。

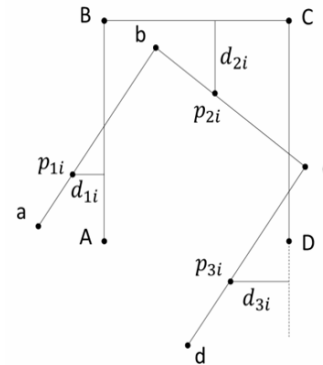


图3 2d标定原理图

线段ab上任一点 p_{1i} 到对应理论线段AB的距离为 d_{1i} ; 线段

bc上任一点 p_{2i} 到对应理论线段BC的距离为 d_{2i} ; 线段cd上任

一点 p_{3i} 到对应理论线段CD的距离为 d_{3i} 。2D激光雷达标定的

核心就是所有扫描点到对应线段的距离之和最小, 即完成了扫描点云与理论点云的最佳匹配。所以, 2D激光雷达标定的数学模型如下:

$$E = \arg \min \sum_{i=1, j=1}^{i=m, j=n} d_{ij}$$

以上公式中, m 是线段的数量, 与标定件结构形式相关, 本发明标定件 $m=3$;

位姿计算同3D激光雷达标定。

2.3 2D激光雷达标定角点提取

而2D激光雷达扫描得到的是一组点云

$S = \{p_1, p_2, p_3, \dots, p_n\}$, 因此, 将点云数据分割成3个部分,

分别是3条线段 ab 、 bc 和 cd 。这里关键的一步就是获得角点 b 和角点^[3] c , 如下图4中所示。

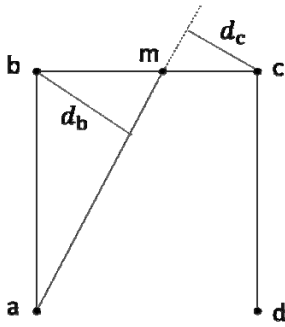


图4 角点提取

如上图4中所示, 点 a 和点 d 是已知的点, 两点之间形成一条线段 ad , 可以计算所有点云 $S = \{p_1, p_2, p_3, \dots, p_n\}$ 到线段 ad 的距离, 从而得到最大的距离点 m , m 点到线段 ad 的距离需要满足要求如下:

$$d_{\max} = \max \{d_1, d_2, d_3 \dots d_n\} = d_m$$

然后, 将 m 点为分段点, 将点云数据 $S = \{p_1, p_2, p_3, \dots, p_n\}$

分割成两部分 $S_1 = \{p_1, p_2, p_3, \dots, p_m\}$ 和 $S_2 =$

$\{p_{m+1}, p_{m+2}, p_{m+3}, \dots, p_n\}$, 然后做线段 am , 计算点云

$S_1 = \{p_1, p_2, p_3, \dots, p_m\}$ 到线段 am 的距离集, 其中距离集

中最大值就是角点 b 。同理, 作线段 dm , 计算点云

$S_2 = \{p_{m+1}, p_{m+2}, p_{m+3}, \dots, p_n\}$ 到线段 dm 的距离集, 计算的

距离集中最大值就是角点 c 。

2.4 激光雷达相对AGV位置标定

通过1)和2)标定算法, 可以得到位姿中间矩阵 R 、 T , 从而可

以得到激光雷达和标定结构件之间的转换关系 T_{CL} , 同时标定

结构件和叉车AGV的转换关系 T_{FC} 可以通过实际测量获得, 最

终通过计算得到激光雷达相对叉车AGV的位置关系 T_{FL} 为:

$$T_{FL} = T_{FC} \cdot T_{CL}$$

3 标定系统设计

基于上述标定理论模型, 进行标定系统设计。整个标定系统过程如下:

- (1) 设定标定件与雷达的理论相对位置, 并对标定件建立理论模型;
- (2) 可以通过升降来改变高度差或者选择雷达的角度来改变标定件和雷达的相对位置, 并测量记录和理论位置的偏差;
- (3) 通过雷达获取标定件的扫描点云;
- (4) 通过标定算法对比扫描点云和理论模型的差异, 计算出偏差值 $x/y/z$ 和角度;
- (5) 对比和观察测量值和标定算法计算出来的偏差值之间的误差。
- (6) 如果误差满足要求, 改变雷达和标定件之间的位置关系, 进行多次测量和验证对比。

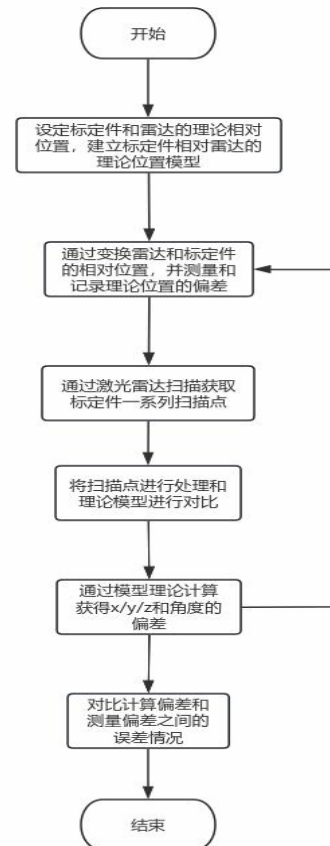


图5 标定流程图

标定流程图见图5所示。

标定系统主要由雷达、标定件、标定平台和标定软件组成。雷达用来获取标定件的点云数据的传感器; 标定件作为被检测物, 用来获取标定数据; 标定平台是用来安装雷达和标定件, 本次测试以叉车作为标定平台; 标定软件是将2章节中标定算法代码实现, 可通过计算获取标定差异值。

4 标定件结构设计

标定结构件的主要作用是采集稳定可靠的点云数据, 同时为了方便计算, 标定结构件的形状采用标准的正方体。因此, 在设计标定结构件的时候, 标定结构件的主体就是5个平面组成的正方壳体, 同时为了方便固定在叉车AGV上, 在正方壳体的四周安装固定用的支腿。为了降低成本和方便拆卸, 整个标定结构件可以通过标准铝合金型材和面板的组合来实现。标定结构件主要由铝合金面板和铝合金型材组成, 通过标准连接角材装配而成。



图6 标定验证测试

标定结构件的特征包括以下方面:

(1) 标定件可拆卸, 易运输。

标定结构件的面板和型材通过标准的角材用可拆卸的螺栓连接, 这样做可以拆卸成单个零件, 方便打包运输。

(2) 标定结构件的颜色是白色, 表面具备漫反射。

白色漫反射的表面可以增加激光反射率, 这样观测到的点

云更加密集, 得到的噪声也会更小。

标定件的面板可粘贴反光带, 从而提高激光雷达扫描的点云的密度。

5 标定验证

将标定件安装在叉车上, 如下图6所示, 使得标定件的中心与叉车的运动中心投影重合, 提升货叉的高度, 使得标定件在雷达的视角范围内, 记录标定件的高度值, 然后, 运行代码进行标定验证。

设定雷达安装理论位置, 相对于叉车运动中心位置坐标是(1, 0, 2.2)和yaw角为0 rad, 多次标定测试结果如下表1所示。

表1 标定结果

位置参数	雷达安装设计数据	第一次标定结果	第二次标定结果	第三次标定结果
x/m	1	1.046	1.043	1.043
y/m	0	-0.01	-0.007	-0.006
z/m	2.2	2.199	2.192	2.195
yaw/rad	0	-0.214	-0.218	-0.214

6 结论

通过标定系统的技术研究和开发, 可以很好的提升机器人的定位精度和多车之间的一致性。标定技术的应用, 带来的主要效果有:

(1) 提升机器人的定位精度;

(2) 不依赖于机械安装和加工的精度, 降低了机器人的制造和安装要求;

(3) 提升了多个机器人定位的一致性, 保障多车可以完成同一个任务。

[参考文献]

[1]韩栋斌,徐友春.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,2018,055(002):449-456.

[2]王晨宇.激光雷达和多相机融合的智能标定方法研究[D].哈尔滨工业大学,2019.

[3]叶珏磊,周志峰,王立端,等.一种多线激光雷达与GNSS/INS系统标定方法[J].激光与红外,2020(1):11-14.

作者简介:

蒋祖武(1987--),男,汉族,广西人,硕士,中级工程师,研究方向: 人工智能。