

自动驾驶客车激光雷达标定软件开发

张智腾, 彭之川, 朱泽敏, 朱 田

(长沙中车智驭新能源科技有限公司, 长沙 410083)

摘要:基于 LabVIEW 开发一套自动驾驶客车激光雷达外参标定的上位机软件, 可实现激光雷达通信诊断、点云可视化、激光雷达外参标定等功能, 能有效提高自动驾驶客车下线标定效率和精度。

关键词:自动驾驶客车; 激光雷达; 标定软件; 点云

中图分类号:U463.67; TN249 **文献标志码:**A **DOI:**10.15917/j.cnki.1006-3331.2025.02.001

Development of LiDAR Calibration Software for Self-driving Buses

ZHANG Zhiteng, PENG Zhichuan, ZHU Zeming, ZHU Tian

(Changsha CRRC Interlligent Control and New Energy Technology Co., Ltd., Changsha 410083, China)

Abstract: The authors develop a host computer software for calibrating external parameters of the LiDAR for self-driving buses based on LabVIEW, which can realize the functions of laser communication diagnosis, point cloud visualization, laser radar external parameter calibration, etc., to effectively improve the efficiency and accuracy of off-line calibration of self-driving buses.

Key words: self-driving bus; LiDAR; calibration software; point cloud

随着自动驾驶技术的推广应用, 激光雷达已逐步成为自动驾驶车辆中常见的传感器之一, 用于障碍物的检测与定位。激光雷达的精确标定对于自动驾驶车辆的定位和导航非常关键。

目前, 对于批量化自动驾驶客车的激光雷达的安装与标定常存在以下两方面问题: 一方面是激光雷达的安装尚未形成一套标准操作流程来保证安装精度, 需要后续对每辆车进行标定校准; 另一方面是标定流程复杂, 对标定人员专业度要求高, 不便于普及。

为保证批量装车时激光雷达外参的一致性、准确性, 标定人员操作简便性, 本文开发一套基于 LabVIEW 的激光雷达标定软件^[1-4], 以简化激光雷达安装旋转角测量方法, 同时保证出厂标定参数的精度, 从而减少感知融合算法部署时的工作量。总装调试人员可通过本软件快速高效地完成批量车激光雷达的安装外参标定, 后续由感知算法部署工程师结合摄像头、毫米波雷达进行进一步的测量精度调试。

1 激光雷达标定算法设计

1.1 激光雷达标定简介

激光雷达是一种使用激光来测量距离的遥感技术, 由激光雷达内部发射器发射固定频率的激光脉冲到目标上, 再通过其内部接收器检测从该目标上返回的相应激光脉冲, 并计算出这些激光脉冲从发射到目标返回所需的精确时间及相位, 以此来计算激光雷达与目标之间的距离。多线束激光雷达可以同时向不同角度发射多束激光脉冲, 照射到目标物后返回包含时间信息的目标物三维坐标点。由于这些三维坐标点的数据量庞大, 因此也被称为点云。多线束激光雷达可对地面环境进行精准的三维检测, 广泛应用于地形测绘、机器人、自动驾驶汽车等领域。

激光雷达标定是指对激光雷达外部参数的标定, 即通过标定确定将激光雷达安装坐标系转移至车辆坐标系产生的水平位移和旋转角度^[5-10], 涉及平移和

收稿日期: 2024-10-14。

第一作者: 张智腾 (1990—), 男, 硕士, 主要从事新能源城市客车自动驾驶感知系统研究工作。E-mail: zhangzhiteng007@126.com。

旋转的变换。激光雷达坐标系 XYZ (Z 轴垂直于激光雷达向上, Y 轴相反于激光雷达出线方向) 与车辆坐标系 $X'Y'Z'$ (X' 为车辆正右方, Y' 为车辆正前方) 如图 1 所示。传统激光雷达姿态 (即位置和方向) 的标定方法是在安装时采用专用的测量仪器对激光雷达相对于 $X'Y'Z'$ 的安装角 (俯仰角 ω 、侧倾角 γ 、旋转角 α) 和位移 (水平偏移距离 Δx 、纵向偏移距离 Δy 、高度偏移距离 Δz 等) 进行测量, 如图 2 所示。上述传统方法对测量工具的精度要求较高, 且短时间内无法验证标定结果, 导致批量化标定精度无法保证。



图 1 激光雷达坐标系与车辆坐标系示意图

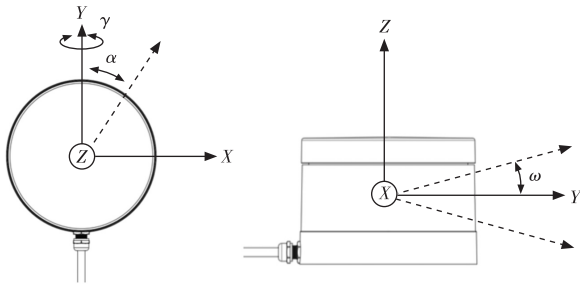


图 2 激光雷达坐标系及旋转角示意图

本文设计的激光雷达外参标定算法及软件, 旨在简化测量过程, 提高批量标定一致性。标定步骤如下: 首先通过人工测量出容易测量的激光雷达实际安装位置的水平偏移距离 Δx 、纵向偏移距离 Δy 、高度偏移距离 Δz ; 然后通过实车获取激光雷达系统正常工作时的地面返回点云数据, 采用本文所设计的标定算法计算激光雷达的安装俯仰角 ω 、侧倾角 γ 两个较难测量的参数; 再结合参照物旋转获取旋转角 α ; 最后在本文设计的软件中将测量和计算得到的以上 6 个外参数值写入配置文件中完成标定。

1.2 点云数据及标定算法设计

激光雷达外参标定算法流程如图 3 所示。

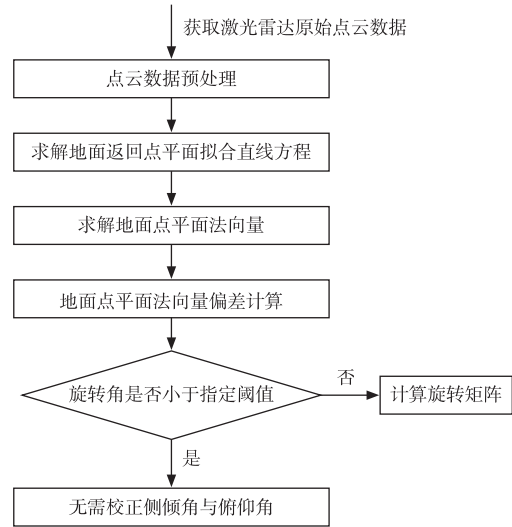


图 3 激光雷达外参标定算法流程图

1) 点云数据获取。将搭载多线束激光雷达的自动驾驶客车停在指定标定区域, 激光雷达系统处于正常工作状态。激光雷达将实时点云数据发送至自动驾驶控制器, 控制器通过以太网以用户数据报协议 (user datagram protocol, UDP) 形式接收这些实时点云数据, 然后在控制器中对点云数据进行预处理。

2) 点云数据预处理。预处理操作包含 UDP 数据解析、坐标系转换。UDP 数据解析是从实时获取的 UDP 数据流中解析出点云中每个点的极坐标原始三维信息, 即每个激光点的距离 L 、水平角度 σ 、垂直角度 φ , 如图 4 所示。

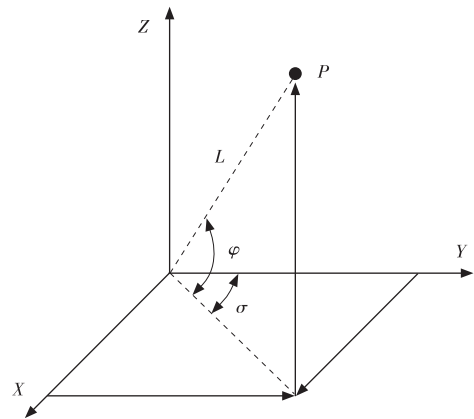


图 4 激光雷达原始点云极坐标

然后将解析出的点云极坐标原始三维信息转换到以激光雷达发射器为原点的直角坐标系 XYZ 中, 按以下公式计算出每个目标点在直角坐标系的位置 $P(x, y, z)$:

$$x = L \cos(\varphi) \sin(\sigma)$$

$$y = L \cos(\varphi) \cos(\sigma)$$

$$z = L \sin(\sigma)$$

3) 求解地面返回点的拟合直线方程。首先通过点云的高度信息筛选出所有地面返回点。然后通过原始点云数据中的水平角度信息 σ 随机选取 2 个角度, 并提取 2 个角度上的所有地面返回点进行拟合。为保证平面法向量的计算精度, 每组 2 个不同水平角度 σ_1 与 σ_2 之间的角度差的绝对值应不小于 30° , 且不等于 180° , 如图 5 所示。最后根据选取的地面返回点, 用最小二乘法拟合出每组地面返回拟合点的两条直线 l_a 与 l_b 的对称式方程如下:

$$(x-x_0)/x_a = (y-y_0)/y_a = (z-z_0)/z_a$$

$$(x-x_1)/x_b = (y-y_1)/y_b = (z-z_1)/z_b$$

式中: (x_0, y_0, z_0) 与 (x_1, y_1, z_1) 分别为激光雷达 XYZ 直角坐标系下直线 l_a 与 l_b 上的地面返回点坐标; (x_a, y_a, z_a) 与 (x_b, y_b, z_b) 分别为直线 l_a 与 l_b 的方向向量系数。

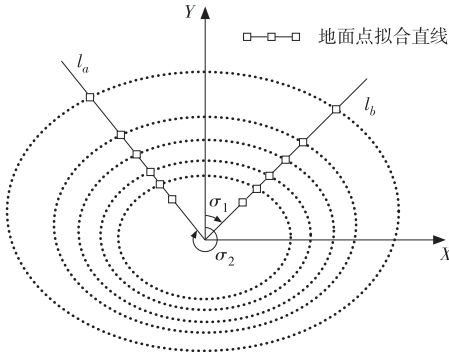


图5 激光雷达地面返回点及拟合点分组选取示意图

4) 地面返回点平面法向量求解。结合以上两组直线方程求出的方向向量 $\mathbf{a}(x_a, y_a, z_a)$ 、 $\mathbf{b}(x_b, y_b, z_b)$, 求解拟合平面 $l_a l_b$ 的法向量 $\mathbf{n}(x_n, y_n, z_n)$, 求解公式如下:

$$\begin{cases} \mathbf{n} \cdot \mathbf{a} = 0 \\ \mathbf{n} \cdot \mathbf{b} = 0 \end{cases}$$

为提高精度, 可按步骤 3) 随机取多组 (不少于 3 组, 且组与组之间所选取的水平角度 σ_1 与 σ_2 均不相同, 如检测到重复角度, 则多加一组) 地面返回点, 拟合多组直线, 并按步骤 4) 分别计算对应面的法向量并求均值, 最后获得 $\mathbf{n}(x_n, y_n, z_n)$ 。

5) 地面返回点平面法向量偏差计算。计算拟合面法向量 $\mathbf{n}(x_n, y_n, z_n)$ 旋转到水平面法向量 $\mathbf{z}(0, 0, 1)$ 的角度 θ , 及拟合面旋转至水平面的旋转轴向量 $\mathbf{n}_R(x_R, y_R, z_R)$:

$$\theta = \arccos(\mathbf{n} \cdot \mathbf{z}), \quad \mathbf{n}_R = \mathbf{n} \times \mathbf{z}$$

判断 θ 是否小于指定阈值 (该阈值一般不大于 2°), 如小于或等于指定阈值, 则激光雷达的俯仰角、侧倾角无需设置; 如大于指定阈值, 则通过下述第 6) 步计算旋转矩阵, 得出激光雷达安装姿态的俯仰角 ω 、侧倾角 γ 。

6) 旋转矩阵计算。通过罗德里格斯旋转公式, 求解旋转矩阵 $\mathbf{R}$:

$$\mathbf{R} = \cos \theta \mathbf{I} + (1 - \cos \theta) \mathbf{n}_R \mathbf{n}_R^T + \sin \theta \mathbf{n}^\wedge$$

式中: $\mathbf{R}$ 为 3×3 的矩阵; $\mathbf{I}$ 为 3×3 的单位矩阵; 符号 $^\wedge$ 是向量到反对称的转换符。

可通过解旋转矩阵求出激光雷达安装俯仰角 ω 与侧倾角 γ 。

$$\omega = \arctan 2(-r_{31}, \sqrt{r_{32}^2 + r_{33}^2})$$

$$\gamma = \arctan 2(r_{32}, r_{33})$$

式中: r_{31}, r_{32}, r_{33} 分别为 $\mathbf{R}$ 矩阵中的 $(3, 1), (3, 2), (3, 3)$ 元素。

7) 最后在车辆坐标系 $X'Y'Z'$ 下的车辆正前 Y' 方向垂直放置一个标准外部参照物 (如交通锥桶), 其中心轴垂直于地面的投影点为 O , 如图 6 所示。通过测量激光雷达中心点实际安装位置的水平偏移距离 Δx 、纵向偏移距离 Δy 、高度偏移距离 Δz , 将激光雷达坐标系 XYZ 原点平移至车辆坐标系 $X'Y'Z'$ 原点, 在激光雷达坐标系中测量该 O 点在激光雷达的返回点 O' 与激光雷达坐标系 Y 轴的水平角 α_0 , 如图 7 所示。坐标变换时, 将全体激光雷达返回点水平角 σ 旋转 α_0 。

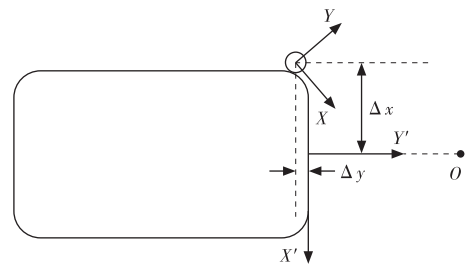


图6 外部参照物放置示意图

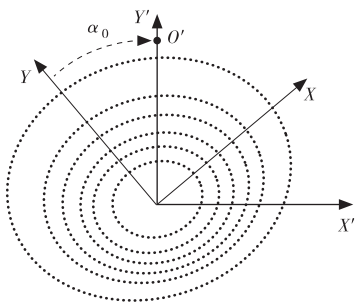


图7 参照物激光雷达返回点水平旋转示意图

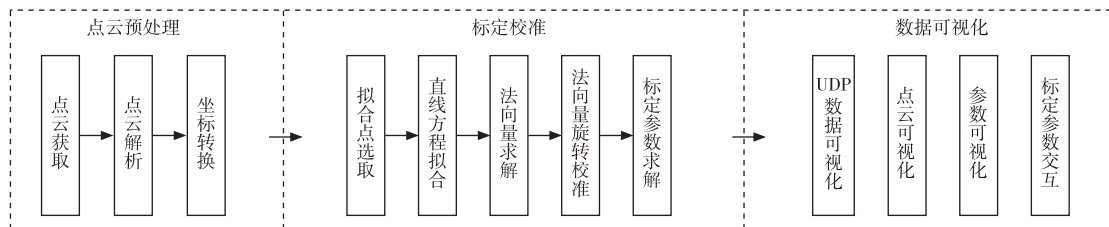


图8 软件总架构

2.2 点云预处理

点云预处理功能模块包含点云获取、点云解析、坐标转换3个子模块,可将激光雷达输出的点云极坐标数据转化为激光雷达直角坐标系下的点云数据。

激光雷达通信方式为以太网通信,点云获取模块通过UDP通信方式获取激光雷达输出的点云数据包,数据包中包含激光测距值、回波的反射率值、水平旋转角度值和时间戳信息;点云解析模块根据通信协议解析出激光雷达坐标系下的激光测距值、水平旋转角度值,即每个激光反射点在极坐标下的位置信息;坐标转换模块将已解析出的激光返回点极坐标转换至激光雷达直角坐标系下的返回点位置坐标。

2.3 标定校准

标定校准功能可对激光雷达安装姿态进行校正,并实现点云数据从激光雷达直角坐标系到车辆直角坐标系的转换。

本功能为核心功能,基于标定算法的软件实现,通过拟合点选取、直线方程拟合、法向量求解、法向量旋转校准、标定参数求解5个子模块,实现激光雷达安装姿态的侧倾角、俯仰角的求解。其中,拟合点选取模块可从所有点云筛选出地面返回点,以随机角度取多组地面返回点,并获取激光雷达实际离地高度;直线方程拟合模块根据拟合点信息计算出2条(或多条)拟合直线方程参数;法向量求解模块通过2条

2 软件设计

2.1 软件架构

本软件为Windows操作系统下的可执行程序,无需特殊配置的电脑和其他硬件支持。该软件主要由三大功能模块组成,分别为点云预处理、标定校准、数据可视化。软件架构设计如图8所示。

(或多条)地面返回点拟合直线求解拟合面的法向量;法向量旋转校准模块可计算拟合面法向量与水平面法向量的夹角、拟合面转至水平面的旋转向量;标定参数求解模块通过上一个模块求解出的法向量夹角与旋转向量,计算出实际激光雷达安装俯仰角与侧倾角数值。

2.4 数据可视化

数据可视化功能可实现UDP数据、点云、激光雷达参数可视化,并可通过标定参数交互功能实现整体转动点云获取安装旋转角 α 。水平偏移距离 Δx 、纵向偏移距离 Δy 、高度偏移距离 Δz 通过测量获取。

用户可通过本功能进行点云接收IP地址和通信端口的快捷配置,并实时查看UDP数据(如图9所示)。只有在供电、通信、IP与端口配置正确的前提下,才会在UDP数据可视化界面显示UDP数据。标定人员根据这个功能可很方便地检查激光雷达是否正常工作。确认激光雷达工作正常后,可通过点云可视化界面(如图10所示),查看激光雷达XOY平面的点云图形,标定人员可在界面拖动旋转点云,校正安装旋转角,并可在激光雷达参数可视化界面显示旋转的角度。然后在标定参数交互界面输入测量得到的水平和纵向偏移值。完成外参标定整体参数的获取之后,保存参数即可完成标定流程。

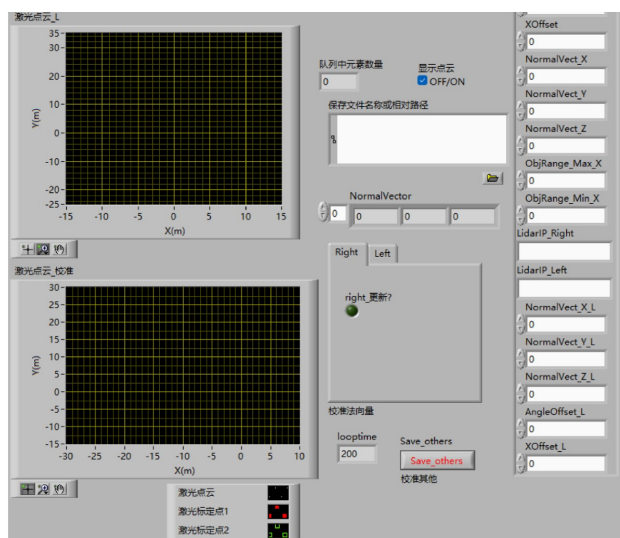


图9 UDP数据可视化界面

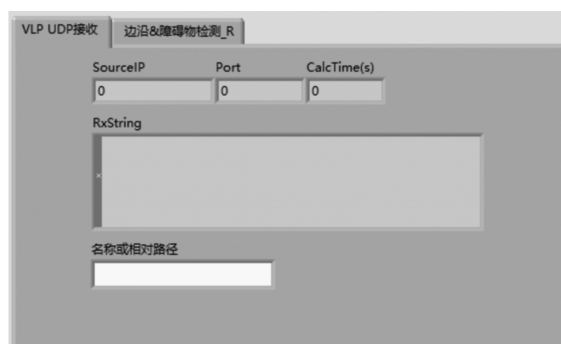


图10 激光雷达点云、参数、校正可视化界面

3 标定验证

为验证所开发软件的标定效果,搭建试验场景进行激光雷达的标定试验。激光雷达采用速腾聚创 RS-Helios 32 线激光雷达,安装于中车 TEG6530BEV02 型号的微循环小巴 A 柱处,通过本文方法进行激光雷达坐标系外参标定,获得外部标定参数,见表 1。

表1 激光雷达标定外参

外参	数值
$\Delta x/m$	0.91
$\Delta y/m$	0.12
$\Delta z/m$	1.03
ω/rad	-0.026 878 071 22
γ/rad	0.017 453 293
α/rad	0.871 966 518 279 999 6

在工厂指定区域布置标定验证场景,在车辆坐标

系 $X'Y'Z'$ 下标记真值点 $P_n (n=0,1,2,\dots,9)$, 每个点的纵向距离为 $(4n+4)$ m, 横向距离为 $(2n+2)$ m, 将 0.7 m 高的交通锥桶放置于每个标记点上, 如图 11 所示。记录每个标记点上交通锥的激光雷达返回点在车辆坐标系下的实际距离, 并计算距离误差。这 10 组验证点的距离精度见表 2。

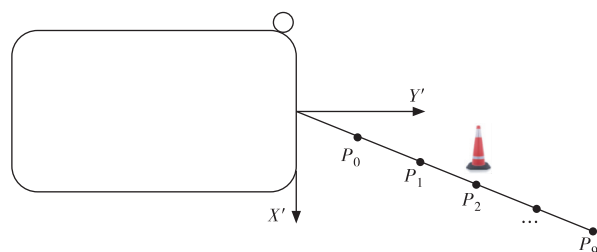


图11 激光雷达标定验证场景示意图

表2 纵向与横向距离误差 m

真值点	纵向真值	纵向误差	横向真值	横向误差
P_0	4	0.04	2	0.02
P_1	8	0.05	4	0.03
P_2	12	-0.04	6	-0.03
P_3	16	0.05	8	0.04
P_4	20	-0.02	10	-0.02
P_5	24	0.04	12	0.03
P_6	28	-0.09	14	-0.05
P_7	32	0.09	16	0.06
P_8	36	0.06	18	0.04
P_9	40	-0.08	20	-0.06

从表 2 可知,纵向距离 25 m 范围内误差不大于 ± 0.05 m, 40 m 范围内误差低于 ± 0.1 m; 横向距离 20 m 范围内误差低于 ± 0.1 m。满足单雷达外参标定要求,可以用于后续感知融合算法部署。

4 结束语

针对自动驾驶客车激光雷达标定常规方法难度大、效率低、专业化要求高的问题,本文开发了一种应用于自动驾驶客车批量化标定的上位机软件。该软件不仅可以检测激光雷达通信状态,还能通过激光雷达点云进行激光雷达外参标定,操作便捷,提高了批量化标定的效率。

(下转第 41 页)

表 7 表 6 中新产品项目 T2 的数据发布计划

零件件号	零件名称	产品科室	长周期	计划时间
F0000101	动力蓄电池	新能源部件科	是	2022. 5. 10
F0000110	驱动电机总成	新能源部件科	是	2022. 6. 20
F0000130	电机控制器总成	动力总成科	是	2022. 6. 20
F0000140	整车控制器总成	新能源标定科	是	2022. 5. 10
F0000150	左前悬架总成	底盘工程科	是	2022. 5. 10
F0000161	右前悬架总成	底盘工程科	是	2022. 5. 10
F0000163	左后悬架总成	底盘工程科	是	2022. 5. 10
F0000174	右后悬架总成	底盘工程科	是	2022. 5. 10
F0000190	六角头螺栓 M8×110	数据工程科	否	2022. 8. 10
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

5 结束语

在数字化信息化的时代,追求效率、质量、成本的汽车产品开发,需要各个方面协同设计,而承载产品研发数据生命周期管理的 PDM 系统是协同设计有效开展及实现的平台工具。本文介绍的 PDM 系统服务器架构及配置、技术标准及管理,第三方设计软件的集成及管理,对基于 PDM 系统的汽车产品协同设计的构建和管理有一定的指导作用。

参考文献:

[1] 徐瑾. 汽车原理与构造[M]. 北京:中国劳动社会保障出版社,2003:7-9.

[2] 刘永清. 汽车整车集成技术[M]. 北京:机械工业出版社,2023:8-10.

[3] 詹姆斯,杰弗里. 精益产品开发体系:丰田整合人员、流程与技术的 13 项精益原则[M]. 精益企业中国,译. 北京:人民邮电出版社,2017:56-81.

[4] 樊辉. 研发再造:IPD 变革管理六步法[M]. 北京:电子工业出版社,2024:149-161.

[5] 舒继武. 数据存储架构与技术[M]. 北京:人民邮电出版社,2023:1-43.

[6] 华为公司数据管理部. 华为数据之道[M]. 北京:机械工业出版社,2020:35-71.

[7] 李少波,刘丹. PDM/PLM 及应用系统集成技术[M]. 北京:机械工业出版社,2024:231-236.

[8] 李迪菲. 论标准化与 PDM 系统在企业产品设计研发中的融合应用[J]. 中国标准化,2022(10):81-86.

[9] 夏忠毅. 从偶然到必然:华为研发投资与管理实践[M]. 北京:清华大学出版社,2019:183-208.

[10] 尹义法. 产品开发项目管理[M]. 北京:机械工业出版社,2022:25-130.

(上接第 5 页)

参考文献:

[1] 陶婷,罗蕊,徐永能. 基于 LabVIEW 的城轨列车轴温监测系统软件设计与实现[J]. 现代制造技术与装备,2017(10):4-6.

[2] 郑锐,付雷杰,刘振涛,等. 基于 LabVIEW 的多数据采集器自动监控软件设计与开发[J]. 计算机测量与控制,2017,25(6):107-111.

[3] 吴丹阳,魏元焜. 基于 LabVIEW 的目标跟踪系统软件设计[J]. 武汉职业技术学院学报,2023,22(3):114-120.

[4] 张迪,刘鑫. 基于 LabVIEW 软件的机器人避障控制系统设计[J]. 计算机测量与控制,2020,28(9):110-115.

[5] 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):243-249.

[6] 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.

[7] 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):449-456.

[8] 杨超,李天剑,胡欢,等. 基于非线性优化的激光雷达在线标定算法[J]. 计算机工程与设计,2021,42(7):1919-1925.

[9] 谢国涛,王帅杰,高铭,等. 基于运动约束的激光雷达与车体坐标系旋转参数标定[J]. 中国公路学报,2024,37(3):259-272.

[10] 龚子恺,席燕辉,沈大勇. 激光雷达外参数的自动标定[J]. 激光与光电子学进展,2023,60(22):283-291.