

· 康复工程 ·

基于多传感器融合的智能轮椅主动安全技术研究*

崔林威¹ 崔建伟^{1,2} 黄子正¹ 李响¹ 杜韩¹

摘要

目的:针对传统轮椅不具备环境感知、导航功能,同时在使用时需要用户密切关注轮椅周围的环境,主动安全性能有待提高等问题,提出基于多传感器融合的智能轮椅主动安全技术。

方法:本研究在轮椅四周分别安装了激光雷达、激光开关传感器、姿态传感器等,首先研究了室外环境地图构建技术,采用统计滤波器和体素网格滤波器对激光雷达采集的高密度点云进行滤波处理,然后使用LeGO-LOAM算法进行环境建图;依据构建的地图进行导航,并提出了导航过程中的物体感知算法,进而通过融合物体类别、移速等感知信息设计了轮椅移动过程中的主动安全防护策略。

结果:通过轮椅功能的室外测试,轮椅具备室外环境建图功能和导航功能,同时在移动过程中能够实现物体感知,利用主动安全防护策略保障受试者的安全。

结论:具有感知和主动安全功能的智能轮椅能够提高轮椅的安全性和智能性,能够为下一代轮椅的设计提供一定的参考。

关键词 智能轮椅;激光雷达;室外建图;物体感知;主动安全

中图分类号:R496,TP242 **文献标识码:**B **文章编号:**1001-1242(2023)-01-0082-05

当前人口老龄化问题日益严重,在全球人口中残疾人患者约占15%,其中约有2.85亿例视力受损或失明患者,轮椅成为了满足其日常出行的必要工具,但传统轮椅不具备物体感知、自主导航等功能,在使用过程中往往需要辅助人员来保障使用者的人身安全^[1]。相比传统轮椅,智能轮椅上安装了测距、雷达、摄像头等传感器,结合感知算法和轮椅控制算法,能够实现轮椅的自主移动,解决室外环境下的移动安全问题,是轮椅的未来发展方向。

智能轮椅的移动方式分为手动、状态检测和自主导航移动三种方式,其中状态检测移动方式是通过检测使用人员的头部姿态、瞳孔中心位置、肌电信号、脑电信号等控制轮椅的移动^[2-5];自主导航移动方式为在轮椅上安装惯性传感器、激光雷达、视觉、测距传感器等,感知轮椅周围的环境,实现轮椅的自主移动^[6-7],目前有关智能轮椅的导航技术有以下研究:李秀智等^[8]学者研究了基于视觉测量的轮椅床对接方法,利用人工路标实现了轮椅的室内视觉定位和自动对接;李艳等^[9]研究了基于计算机视觉的轮椅跟随系统,利用视觉实现目标跟踪、位置预测和双目定位;杨怡等^[10]在轮椅上安装二维雷达,识别目标人员和障碍物,实现了轮椅的自动跟随和避障功能。

轮椅的自主导航移动无需人为参与,智能化、自主化更高,同时也对主动安全性能提出了更高的要求,轮椅的主动安全技术是指通过预先防范,在不同的路面行驶状况下,辅助驾驶员轻松控制轮椅,主动刹车、避障等保障轮椅的使用安全。现有国内外提高轮椅主动安全性能的研究如下:Hellstrom Thomas等^[11]为视力或运动能力有限的人群设计了一款辅助移动装置,在轮椅的前、左和右方向安装了8个红外距离传感器,实现了轮椅的主动避障和安全;Chen Qinghua等^[12]结合HC-SR04测距模块、姿态测量、定位模块和语音模块实现了一款能够避障、定位和报警的智能轮椅;张震等^[13]设计了轮椅安全健康系统,通过云端服务器获取轮椅的实时状态和监测数据,远程控制轮椅。Naveen Aryan等^[14]研究了智能轮椅的3D建图和稳定性预测,结合RTAB和雷达里程计构建环境地图,并进行三维点云的泊松重建预测了轮椅的稳定性。另外,目前市场中的轮椅为手推式和电动式轮椅,其主动安全模式为双手离开控制摇杆,轮椅主动停止,从而防止轮椅继续移动,并不具备障碍物感知、导航功能。

现有研究及相关产品存在安全性能不足、使用的传感器模组易受室外复杂环境的影响,因此为提高智能轮椅的自主导航和主动安全性能,保障使用者的出行安全,文章研究了

DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2023.01.015

*基金项目:国家重点研发计划项目(2020YFC2007401)

1 东南大学仪器科学与工程学院,江苏省南京市,210096; 2 通讯作者

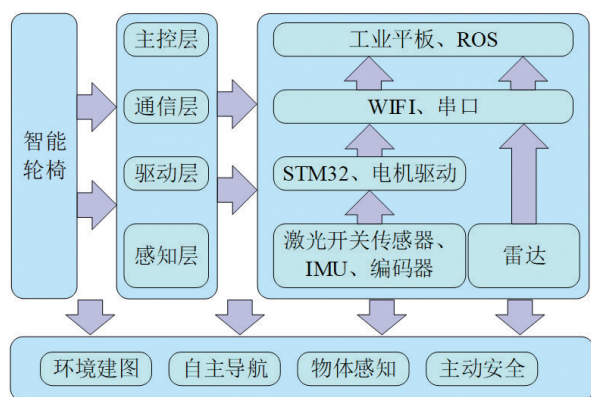
第一作者简介:崔林威,男,硕士研究生; 收稿日期:2021-11-16

基于多传感器融合的智能轮椅主动安全技术。相较传统轮椅,安装了激光雷达、激光感应传感器、惯性传感器(inertial measurement unit, IMU)等多种传感器以感知轮椅所在的环境和自身状态,实现了环境地图构建和导航功能;同时融合基于激光雷达的物体感知算法和多模传感器的检测信息,研究了轮椅的主动安全算法和导航策略,主动安全性能更高,更能保障使用人员的安全。

1 智能轮椅设计

文章设计的智能轮椅是在传统轮椅的结构基础上安装了激光雷达、嵌入式处理器等模块,使其具备环境感知、轮椅状态感知、室外环境建模、自主导航、主动安全等功能,智能轮椅的系统框图如图1所示,各模块作用如下:工业平板作为系统的主控制器,负责与STM32微处理器通信,获取轮椅状态,发送控制指令,并采集激光雷达采集的点云,进行三维建模;STM32微处理器用于接收工业平板的指令,驱动智能轮椅的4个电机,利用编码器采集电机的转动状态,并实时获取安装在智能轮椅四周的激光开关传感器的状态,反馈给工业平板;激光雷达安装在轮椅的左前方,用于实时采集轮椅前方的环境点云信息;激光开关传感器安装在轮椅的左、右和后方,用以检测轮椅四周的障碍物;编码器和驱动器用于驱动电机,检测电机的转动情况;IMU模块用于检测轮椅的姿态。

图1 智能轮椅整体框图设计



结合图1,文章设计了智能轮椅的移动模式,包括手动模式和主动控制模式。在手动模式下,使用者可通过轮椅上的360°旋转摇杆控制轮椅的移动方向;在主动控制模式下,利用轮椅的导航功能进行自主移动,首先工业平板对激光雷达采集的室外点云进行滤波,然后利用建图算法进行地图构建,根据构建好的地图进行轮椅的自主导航。在轮椅移动的过程中,STM32处理器会结合基于激光雷达的物体感知信息和轮椅四周感应传感器的检测信息评估轮椅的安全状态,

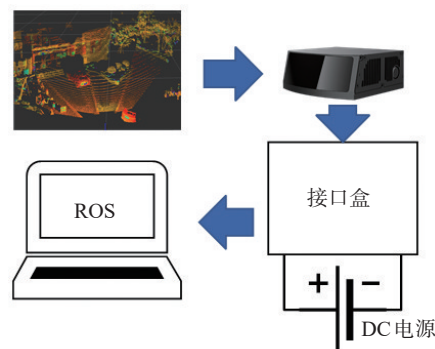
当检测到障碍物后利用主动安全防护策略保证使用者的安全,从而实现智能轮椅移动的灵活性和安全性。

2 室外环境建图

2.1 三维激光雷达

室外三维场景建模的准确与否,关系到轮椅自主导航时的安全性和准确度。在构建三维地图时需要获取大量的环境信息,同时在轮椅移动时需要实时采集丰富的点云信息以保证轮椅的实时安全。考虑到室外光线多变、环境复杂的问题,文章选用速腾聚创(RoboSense)公司的三维激光雷达,该雷达是目前全球第一也是唯一一款针对自动驾驶乘用车推出的基于MEMS智能扫描技术及AI算法技术的Smart LiDAR Sensor^[19],能够在2D MEMS振镜快速震动的同时发射高频率激光束对外界环境进行持续性的扫描,经过测距算法提供三维空间点云数据。另外,激光雷达的测量距离高达200m,点云出点数高达750000点/s(单回波模式),水平测角120°(-60.0°—+60.0°),垂直测角25°(-12.5°—+12.5°),可用于扫描轮椅前方的环境信息;采用主数据流输出协议(main data stream output protocol, MSOP),能够返回激光测距值、回波的反射强度值、垂直角度、水平角度和时间戳。如图2所示为激光雷达的数据采集方式,最终在ROS平台实现雷达扫描的可视化。

图2 MEMS三维固态激光雷达



2.2 激光点云预处理

激光雷达采集的点云数据包括道路、树木、建筑物、行人和其他障碍物,在采集数据时采用单回波方式,此时每秒有750000个点云坐标数据,时间复杂度较大;同时受噪声的影响还会出现离群点,过多的点云也会加大建图算法的处理时间,因此需要对激光点云进行预处理,文章使用统计滤波器和体素栅格滤波器对原始点云数据进行滤波处理。

激光点云中的离群点在空间中分布较为稀疏,信息量小,可以利用点云的密度阈值来分离离群点与非离群点,统计滤波器算法能够实现大规模点云数据种的离群点剔

除^[16]。主要为以下步骤:①对于n个点云,计算其中每个点与相邻k个点的平均距离 $\mu_1, \dots, \mu_n$;②计算 $\mu_1, \dots, \mu_n$ 的平均值 μ 和标准差 σ ,如式(1);③设定距离阈值 $d = \mu + \alpha \times \sigma$,将平均距离大于d的点剔除掉,其中 α 为调节系数,可根据不同点云情况进行修改。

$$\mu = \sum_{i=1}^n \mu_i / n \quad (1)$$

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\mu_i - \mu)^2 / (n - 1)}$$

体素网格滤波器用于对原始点云进行采样,降低点云的密度。在处理时将原始点云分割成一个个立方体网格,并计算每个网格内的点的质心,用来近似表示该3D网格内的其他点。在处理过程中采用下采样方法,可以加速点云处理过程且不破坏点云本身的几何结构^[17]。

$$x = \sum_{i=1}^k x_i / k$$

$$y = \sum_{i=1}^k y_i / k \quad (2)$$

$$z = \sum_{i=1}^k z_i / k$$

2.3 三维环境建图算法

经过滤波后的三维激光点云可以用于室外场景的建模,三维激光SLAM算法包括基于关键点的LOAM及其改进算法LeGO_LOAM和A_LOAM、LIO等^[18],其中LeGO-LOAM是Shan, Tixiao提出的一种轻量级和地面优化的激光雷达测距和建图算法,适用于具有可变地形的复杂环境可用于无人车的建图与位姿估计^[19]。

文中采用图3的原理框图进行环境建模。LeGO_LOAM包括点云分割、点云特征提取、雷达里程计和融合建图四个部分,在轮椅移动的过程中,利用点云分割模块将三维点云数据重投影到二维图像中,并分割地面点和非地面点;点云特征提取模块用于选取边缘点和平面点;雷达里程计即图3中的编码器,用于将k时刻的点云和k+1时刻的点云关联起来,估算轮椅的位姿;最后进行融合建图,LeGO-LOAM算法在运行时会根据雷达发送的每帧激光点云数据对地图进行拼接,最终获得一幅完整的三维地图。

3 导航与主动安全技术

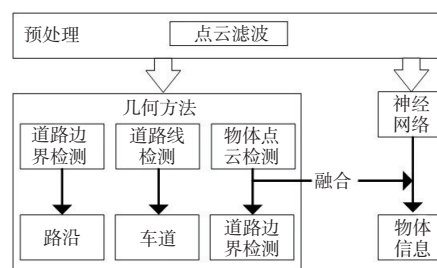
在获得室外环境地图后,依赖于机器人操作系统(robot

operating system, ROS)提供的路径规划和定位功能包,可以获得轮椅与目标位置之间的路径规划信息,依据此信息可以实现轮椅的自主导航。但是在轮椅移动的过程中,仍需要融合实时的激光点云、激光开关传感器数据,分析路面障碍物信息以完成动态避障功能,文章首先研究了RS-LiDAR-M1的物体感知算法,然后结合多个传感器数据设计了主动安全算法,以保障轮椅移动过程中的安全。

3.1 动态物体感知算法

激光雷达RS-LiDAR-M1内置AI感知算法,不仅可以获得高分辨率的激光点云数据,其内部的AI算法还能够同步输出道路环境感知信息。激光雷达实时采集路面的点云数据并发送到工控机,结合Robosense Smart Sensor感知SDK,融合基于几何规则的传统点云算法和基于数据驱动的深度学习算法对激光点云进行处理,完成物体的实时运动感知和识别,算法设计原理如图4所示。算法能够在ROS平台的Rviz界面输出激光点云的检测目标框、道路边界、车道线检测和识别信息,包括行人、骑行者、车辆信息等。

图4 激光雷达物体感知算法



3.2 主动安全策略研究

智能轮椅在室外使用的过程中,尤其是在自主导航移动时,需要保证其安全性能,防止与四周的物体相撞。为提高轮椅的主动安全性能,本文设计了基于多传感器融合的主动安全策略。

在轮椅移动过程中,智能轮椅上的激光雷达和六个一维激光感应开关会实时感知轮椅周围的物体,如图5为感知范围示意图。激光雷达用于感知轮椅正前方120°、60m范围内的物体,利用感知算法获取物体的速度、与轮椅之间的距离;一维激光感应开关传感器用于感知轮椅左、右、后方的障碍物信息,将传感器的感应范围设定为50cm,在轮椅移动的过程中,当传感器1—6检测到物体在50cm范围内,会向嵌入式处理器发送电平信号。通过激光雷达和激光感应传感器的融合,可以获得准确的路面信息,保证轮椅实时移动过程中的安全性。

结合传感器感知到的移动障碍物信息,文章设计了主动安全策略,分为以下三种情况:①停止策略,当激光雷达检测

图3 室外环境建模原理图

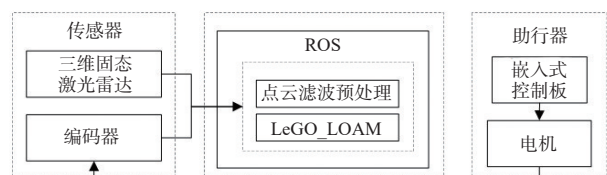
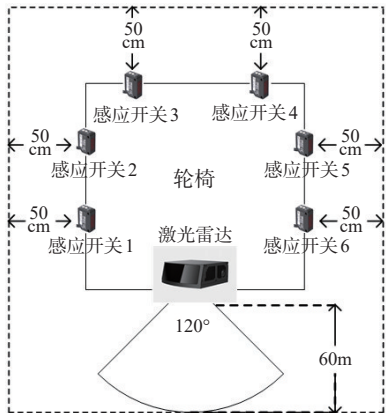


图5 传感器安装及安全防护范围



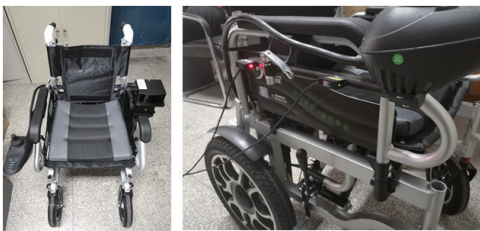
到轮椅前方有固定的物体,且与轮椅的距离<2m,则此时轮椅停止移动,等待人工处理;②规避策略:轮椅左侧、右侧、后侧的激光感应传感器检测到有可移动障碍物时,轮椅根据相对速度采取远离规避措施;③居中策略:轮椅左侧、右侧、检测到有障碍物时,根据路面情况,进行最优居中处理。

4 实验结果

4.1 智能轮椅及参数

按照图1的轮椅设计图,将激光雷达、6个激光感应传感器、电机、编码器、IMU、蓄电池和工控机等安装到轮椅上,如图6为安装完毕后的智能轮椅以及激光雷达和激光感应传感器的安装示意图,IMU、工控机、编码器等安装在坐垫下方。

图6 智能轮椅安装示意图



文章设计的轮椅面向腿脚受伤、行动不便但有一定生活自理能力的年轻人、老年人等,按照满足使用者出行速度需求、使用便捷性需求进行了轮椅配套装置的选型:轮椅的移动采用了250W的移动电机,移动速度为0—6km/h;为实现轮椅对环境和自身状态的感知,选取了测距范围达200m的激光雷达,能够探测到更远的物体;考虑到轮椅正常行驶下的避障要求,将激光感应传感器的探测距离设定为0—50cm;编码器用于检测轮椅的移动距离,因此选取了分辨率为0.09°的编码器,精确测量轮椅的移动距离。相关参数如表1所示。

表1 轮椅主要参数

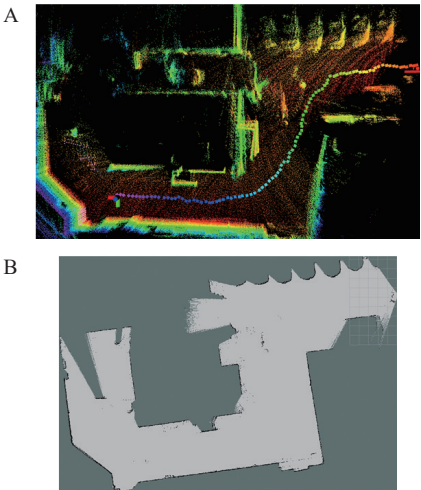
模块	指标
轮椅	
电机	250W
电源	24V/20A
三维激光雷达	
测距能力	0.5—200m
精度	±3cm(1 sigma ²)
帧率	10Hz
角分辨率	0.2°
激光感应开关	
检测距离	0—50cm
编码器	
分辨率	0.09°
位数	12位

4.2 室外环境建图

在将传感器部署到轮椅上后,团队在室外进行了环境建图实验,由使用人员驾驶轮椅在指定场地移动,在移动的过程中激光雷达采集点云数据,并发送到工控机进行滤波。经实验,经过统计滤波器和体素网格滤波器双重滤波后的激光点云中的离群点被剔除,同时点云密度也降低了。

在获得滤波后的激光点云数据后,采用LeGO_LOAM算法进行三维建图,同时在实验过程中该算法的定位误差为3.5%,能够满足轮椅系统的定位要求。另外,为了实现轮椅的自主导航,还需要获得所在环境的二维地图,因此在生成三维可视化地图的同时,同步输出二维环境地图。二维地图和三维地图如图7(A)和7(B)所示。

图7 室外环境建图效果



4.3 主动安全实验

为了验证智能轮椅的主动安全性能,文章进行了以下实验:①在轮椅移动时,利用激光雷达感知算法实时感知轮椅前方的物体信息;②在轮椅的四周,人为进入轮椅的安全范

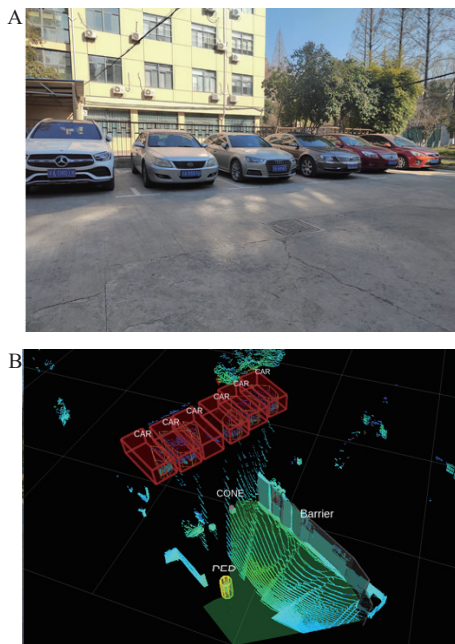
围,查看激光开关传感器是否能检测到障碍物,以及轮椅能否按照指定策略处理障碍物情况。

图8为在轮椅移动过程中,利用感知算法检测的轮椅前方的物体信息,雷达配备的感知算法能够输出以下信息:0(未知),1(行人),2(自行车),3(汽车),4(卡车/公共汽车),其中(A)和(B)分别显示了实际路面环境和物体检测结果,相关的识别结果会实时发送到工业平板。

结合雷达和激光感应传感器的感知结果,团队进行了轮椅的主动安全测试实验,测试在轮椅移动过程中的障碍物的避障能力。

在上述实验中,轮椅的移动为用户在可视化界面操作,在二维地图中选择目标位置,然后轮椅自主避障、移动。

图8 原始道路图像及感知结果



5 结论

本研究对传统轮椅进行智能化改进,通过安装三维激光雷达、激光感应传感器、IMU等,研究了智能轮椅的室外三维建模及主动安全技术。首先融合统计滤波器和体素网格滤波器滤波算法,降低了激光点云数据的复杂度,并结合LeGO-LOAM算法实现了室外环境建模;接着研究了基于激光雷达和激光感应传感器的主动安全技术,利用激光雷达感知算法获取轮椅前方物体的信息,同时利用激光感应传感器扫描轮椅四周的障碍物,实现了智能轮椅移动过程中周围50cm范围内的主动安全。文章研究的建模和主动安全算法能够进一步提高智能轮椅的安全性能,为轮椅的室外导航提供准确的数据,有利于智能轮椅的发展。

参考文献

- [1] 陶春静,晏管阳,马俪芳,等. 残疾人智能移动轮椅的发展现状及趋势[J]. 科技导报, 2019, 37(22): 37—50.
- [2] Jigme Wangchuk Machangpa, Tejbanta Singh Chingtham. Head gesture controlled wheelchair for quadriplegic patients [J]. Procedia Computer Science, 2018, 132: 342—351.
- [3] Luo Wenping, Cao Jianting, Ishikawa Kousuke, et al. A human-computer control system based on intelligent recognition of eye movements and its application in wheelchair driving[J]. Multimodal Technologies and Interaction, 2021, 5(9):50—50.
- [4] 李鑫,祁蒙,董海清,等. 机电智能轮椅控制系统设计[J]. 仪表技术, 2018(9)16—19.
- [5] 郭倩,冯奇,屈萍鸽,等. 轮椅脑控算法研究与实验验证[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(2): 229—233, 255.
- [6] 于福超,李元龙. 一款基于北斗导航的智能导诊轮椅[J]. 中国科技信息, 2020(15)53—54.
- [7] 张毅,徐仕川,罗元. 基于ROS的智能轮椅室内导航[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2015, 27(4): 542—548.
- [8] 李秀智,梁兴楠,贾松敏,等. 基于视觉测量的智能轮椅床自动对接[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(4): 189—197.
- [9] 李艳,唐达明,周莹亮,等. 基于计算机视觉的轮椅跟随系统设计[J]. 计算机工程与应用, 2021, 57(10): 163—172.
- [10] 杨怡,李文锋. 基于模糊控制的轮椅自主跟随与避障系统[J]. 计算机测量与控制, 2018, 26(9): 93—96, 102.
- [11] Thomas Hellström, Olof Lindahl, Tomas Bäcklund, et al. An intelligent rollator for mobility impaired persons, especially stroke patients[J]. Journal of Medical Engineering & Technology, 2016, 40(5): 270—279.
- [12] Chen Qinghua, Qinghua Chen, Taihu Zuo, et al. Design and realization of intelligent wheelchair based on STM32 [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1678(1): 012114.
- [13] 张震,刘新妹,殷俊龄,等. 基于ARM的智能轮椅安全监控系统的设计[J]. 国外电子测量技术, 2021,40(6):138—143.
- [14] Naveen Aryan, Luo Haitao, Chen Zhimin, et al. 3D mapping and stability prediction for autonomous wheelchairs [C]. IEEE Annual International Conference on Cyber Technology in Automation Control and Intelligent Systems, 2020: 225—230.
- [15] 王吉. 固态激光雷达、结构及其控制方法[P]. 广东省: CN110275177B. 2021-07-02.
- [16] 杨旭. 激光雷达点云数据的滤波和分割处理[D]. 哈尔滨工业大学, 2020.
- [17] 黄思源,刘利民,董健,等. 车载激光雷达点云数据地面滤波算法综述[J]. 光电工程, 2020, 47(12): 3—14.
- [18] 欧阳仕哈,刘振宇,赵怡巍,等. 移动机器人三维激光SLAM算法研究[J]. 微处理机, 2020, 41(5): 58—64.
- [19] Shan Tixiao, Englot B. LeGO- LOAM: Lightweight and ground-optimized lidar odometry and mapping on variable terrain[C]. 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems(IROS), 2019: 4758—4765.