

多传感器融合室外移动机器人SLAM系统设计

邝禹聪¹,容爱琼¹,谭锦城²,余迪宇¹

(1. 广州城市理工学院机械人工程学院,广州 广州 510800;2. 广州城市理工学院电子信息工程学院,广州 广州 510800)

摘要:多传感器融合室外移动机器人系统是一种新兴的机器人技术,可以应用于环境检测、搜救、智能农业、无人配送等领域。近年来,国内外多家互联网公司都在研发此类技术。与乘用车无人驾驶技术相比,室外移动机器人融合了很多传感器技术。该系统利用多线激光雷达、IMU(惯性测量单元)和GPS(全球定位系统)这3个传感器实现了松耦合的建图和定位。由于这3个传感器各自具有优缺点,在本实验中其互相协作,实现了更精确的定位和建图。打造了一个稳定的室外自主移动机器人平台,以实现精确的定位、建图和路径规划。该系统不仅能够高效地构建室外环境地图,实现机器人在该环境中的精确定位和路径规划,还可以有效地融合传感器数据,实现对机器人位置的高精度估计。

关键词:多传感器融合;室外SLAM;激光雷达;路径规划

中图分类号:TP242;TP391

文献标志码:A

文章编号:2095-6835(2025)19-0013-04

近年来,随着硬件技术与计算机科学的飞速发展,机器人技术迎来了前所未有的突破和发展。越来越多的机器人从室内走向室外,开始在复杂多变的环境中承担各种任务。例如,“小蛮驴”配送机器人在校园和社区中穿梭,为人们提供便捷的物流服务。这些机器人的广泛应用极大地提升了社会经济效益,同时也吸引了无数研究者投身于该领域的开发与研究^[1]。

然而,机器人要在室外环境中实现自主移动并非易事。与室内环境相比,室外环境更加复杂多变,存在诸多不确定因素,如光照变化、天气影响、复杂的地形等。这些因素对机器人的感知能力和导航精度提出了更高的要求。单纯依赖单一传感器的方法已无法满足室外机器人的需求。单一传感器的抗干扰能力和稳定性较弱,难以适应复杂的室外环境。

多传感器融合技术的核心在于将多种传感器的数据整合在一起,共同完成某一个功能^[2]。这种融合技术不仅提高了机器人的抗干扰性,还增强了其在复杂环境中的适应能力。本文旨在深入研究多传感器融合技术在室外移动SLAM(同步定位与建图)系统中的应用。

1 机器人系统组成与设计

1.1 机械结构

根据机器人应用需求,设计配送机器人机械结构,全车框架采用金属方管焊接而成,确保框架强度。轮

组采用步进电机带大轮的配合,使机器人具有足够的越障能力。转向使用齿轮齿条配合,相比传统转向结构所占的空间更小,在相等体积下能使机器人具有更大的载货空间。

机器人实物如图1所示。



图1 机器人实物

1.2 硬件组成

根据软件的功能框架,室外自主式移动机器人硬件平台主要分为三大部分,分别是上位机层、下位机层以及中心板供电层。上位机主要负责获取各传感器数据并进行运算,最终将速度控制指令传输到下位机;下位机主要负责接收上位机发送过来的速度指令,并解析成底盘电机的转速进而控制底盘运动;中心板主要负责给下位机、电机提供电源,保证其正常运行。整车的硬件框架如图2所示。

作者简介:邝禹聪(1985—),男,汉族,广东广州人,硕士,实验师,研究方向为机电一体化控制。

容爱琼(1986—),女,汉族,广西贵港人,硕士,副教授,研究方向为机器人控制。

谭锦城(2002—),男,汉族,广东江门人,本科,研究方向为电子自动化。

余迪宇(2003—),男,汉族,广东东莞人,本科,研究方向为机器人机械结构。

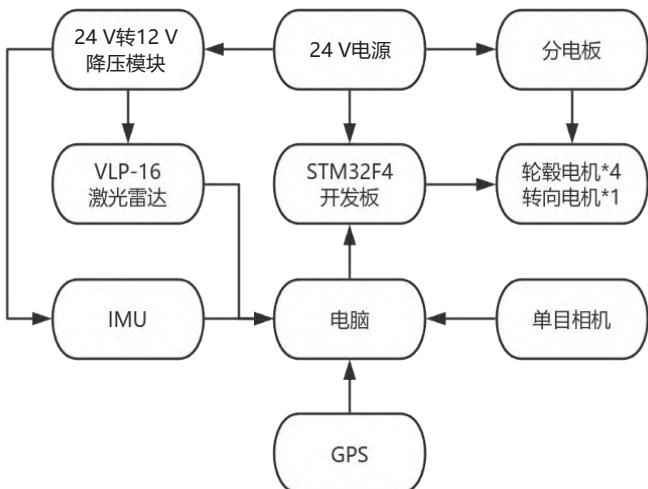


图2 整车的硬件框架

2 机器人多传感器数据融合建图

建图与定位任务流程如下：首先，根据从激光雷达中录制的点云数据完成NDTmapping的离线建图，并将地图发布出来；其次，从传感器中获取数据，其中，激光雷达的点云需要经过voxel_grid_filter的降采样处理，然后与IMU、GPS数据以及NDTmapping得到的PCD点云地图一同进入到NDTmatching中进行融合定位；最后，由NDTmatching输出机器人的位置。

2.1 传感器的外参标定

传感器外参标定是确定传感器在特定坐标系下的位置和方向,以及与其他坐标系之间转换关系的过程。这通常需对传感器进行一系列测试和测量,收集其在不同位置和方向下的输出数据,并与实际物理世界中的位置和方向进行比较,从而确定传感器的外部参数。本文使用的传感器包括多线激光雷达、IMU 和 GPS。由于这些传感器之间的位置关系不同,因此需要对其进行外参标定,以确保数据的一致性和准确性。

IMU 内部包含加速度计、陀螺仪和磁力计等传感器,可在固定于物体上后捕获物体在运动中的一些信息,如三轴加速度、三轴角速度、三轴角度和三轴磁场信息,以此得知物体的状态。但由于机器人的机械结构和激光雷达的放置位置的限制,IMU 无法被固定在 VLP-16 激光雷达上,因此需要对二者进行外参标定。

2.2 NDT建图

本文采用正态分布变换算法(NDT)构建点云地图。首先,使用ROS的bag工具录制多线激光雷达点云数据,并导入ndt_mapping进行离线建图^[3]。

NDT是一种基于正态分布理论的统计学模型,通过随机向量数据集的概率密度函数建模实现配准。由于激光雷达点云为三维空间坐标,因此需采用三维正态分布建模。NDT通过概率形式描述点云分布,从而

减少配准时间。

NDT 构建点云地图的完整流程如下：首先，从车辆的激光雷达或其他传感器获取点云数据，并将其转换到车辆或地图坐标系中；其次，对点云数据进行降采样以减少噪声和数据量，并去除因车辆运动导致的畸变；再次，使用 NDT 算法将新点云与先前点云配准，计算位姿变换；最后，将配准后的点云合并到地图中，构建环境地图并进行可视化，便于查看和分析^[4]。

2.3 点云配准

点云配准技术通过对齐两个或多个点云数据集，在计算机视觉、机器人技术和自动驾驶等领域发挥着关键作用。其核心是识别点云之间的相似性，通过旋转、平移和缩放等变换最小化点云之间的误差。点云配准方法可分为两类，分别为基于特征的方法和基于优化的方法。基于特征的方法利用点云中的关键特征（如角点、边缘）进行匹配，适用于小型数据集和特征明显的目标；基于优化的方法通过迭代寻找最优变换，适用于大型数据集和特征差异较大的对象，常见算法包括迭代最近点（ICP）、非刚性配准和正态分布变换（NDT）等^[5]。

NDT通过将参考点云转换为多维正态分布,利用优化算法(如牛顿法)求解最大化概率密度的变换参数,实现最佳匹配。NDT将三维空间划分为立方体,并在每个立方体内存储概率密度。与ICP不同,NDT不直接计算点对距离,而是通过概率分布匹配,更能容忍环境变化,适用于大地图和密集点云场景。

3 路径规划

3.1 三维激光点云生成栅格地图

`costmap_generator` 模块主要用于生成静态和动态障碍物的代价地图，用于规划模块的路径规划和障碍物避障。该模块可以从激光雷达数据中提取障碍物信息，并生成相应的代价地图。具体步骤如下。

将点云数据转换为二维栅格地图：点云数据中的点往往是三维的(x, y, z)，但是需要将其转换为二维栅格地图。

进行障碍物分割：栅格地图中包含很多障碍物的点，需要使用聚类算法将这些点聚集成障碍物。通常使用基于欧几里得距离或基于特征的聚类算法来实现。

计算代价:对于每个点云簇,需要计算其代价,代价通常用来表示通过该区域的难度。如果一个点云簇被视为障碍物,那么其代价将非常高,因为车辆需要绕开这个点的云簇。如果一个点云簇被视为自由空间,则其代价将为0。

生成代价地图:将栅格地图中的所有点的代价相加,得到一个全局代价地图。此时,已经将激光雷达数据转换为代价地图,可以用于规划安全路径。

3.2 路径规划与避障

机器人路径规划的流程从准确定位机器人在预设地图上的位置开始。首先,系统调用 waypoint_loader 组件生成从起点到目标点的初步路径点。其次,astar_avoid 模块基于这些路径点识别并规避障碍物,规划出一条安全且连贯的路径。再次,velocity_set 模块为路径上的每个点分配适当的速度、加速度和转弯速率,确保机器人以最优方式行驶。完成速度配置后,纯跟踪模块根据路径点信息计算机器人的原始速度控制

指令。最后,速度滤波器检查指令和处理异常值,确保其准确性和安全性。处理后的指令通过串口程序发送,实现对机器人的精确控制,使其安全、高效地沿规划路径行驶。这一流程不仅确保了机器人能避开障碍物,还优化了行驶速度和加速度,提升了整体效率和安全性^[6-8]。

4 实验

在建图实验开始之前,先将机器人放置到起点,再对传感器上电。运行建图程序,并使用遥控控制机器人运动,建图过程中控制机器人的速度为 1 m/s,确保建图完整。点云地图俯视图如图 3 所示。

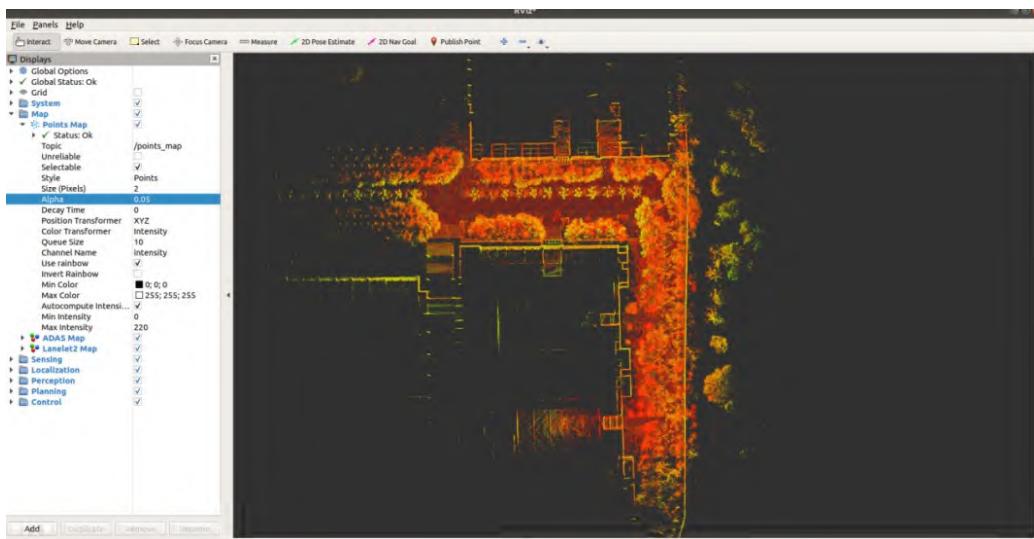


图 3 点云地图俯视图

从图 3 可以看出,创建出来的点云地图无扭曲变形,在各方向上都对齐,且树木上的点无重影。

点云地图创建完成后,导入点云地图,开启激光雷达点云降采样节点,最后开启定位功能。

在激光雷达建图完成后,进行机器人路径规划实验。首先,确保机器人定位成功,并将路径点导入地图中。其次,依次启动 costmap_generator、astar_avoid、velocity_set 和 pure_pursuit 节点,生成并跟踪一条规划好的安全路径。

astar_avoid 模块基于初步路径点识别并规避障碍物,通过智能算法规划出一条避开障碍的安全路径。接着,velocity_set 模块为路径上的每个点分配适当的速度、加速度和转弯速率,确保机器人以最优方式行驶。完成速度配置后,pure_pursuit 模块根据路径点信息生成机器人的原始速度控制指令。为确保指令的准确性和安全性,系统会对异常数据进行滤波处理。处理后的指令通过串口程序发送,实现对机器人的精确控制,使其安全、高效地沿规划路径行驶。

纯跟踪与点云聚类识别障碍物距离如图 4 所示。

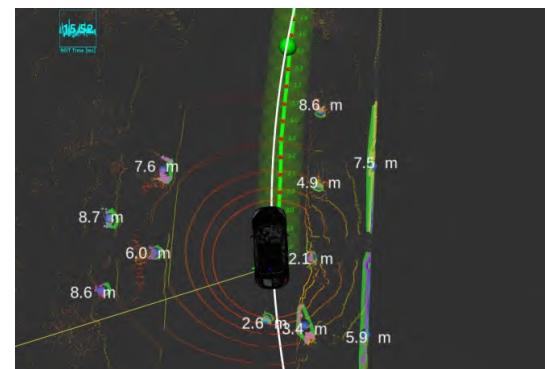


图 4 纯跟踪与点云聚类识别障碍物距离

对搭建起来的机器人平台进行建图、定位与路径规划实验。首先,利用 VLP-16 激光雷达和 IMU 进行点云地图构建,创建出来的点云地图无扭曲变形,在各方向上都对齐,且树木上的点无重影;其次,增加 GPS 与激光雷达和 IMU 进行融合定位,通过实验可看出,无论是上下坡还是在树木草丛密集的地方,都能准确定位;最后,在定位成功后对机器人平台进行路径规划实验。实验表明,使用多传感器融合的方式能大大提高机器人室外自主移动的稳定性。

5 结束语

功能实现方面,通过多线激光雷达和NDTMapping构建离线点云地图。对点云数据降采样后,结合IMU数据输入到NDTMatching算法中,完成位置预测和点云匹配,实现定位。若机器人偏离初始化位置超过一定距离,则利用GPS校准位置,随后继续使用点云匹配进行定位。

在建图过程中，机器人记录一系列路径点，并通过纯跟踪算法对这些点进行跟踪控制。对于机器人线速度和角速度的异常值，通过速度滤波处理，确保机器人平滑行驶^[9]。

综上所述,多传感器融合技术在室外移动SLAM系统中的应用具有重要的研究意义和广阔的应用前景,其不仅能为室外移动机器人的发展提供有力支持,还能促进其功能的完善与智能化升级。随着技术的不断进步,未来室外移动机器人将更加智能、高效,为人们的生活和工作带来更多的便利。未来研究可探讨如何利用该系统进行室外环境的三维建模,为机器人提供更全面的环境信息,进一步提升其智能化水平^[10]。

参考文献：

- [1] 赵金燕,王高乐,蔡雅超,等.基于STM32的街道巡检消毒

(上接第12页)



图 12 隧道爆堆现场装运图

4.4 经济指标分析

本隧道的断面面积为 132 m^2 , 炮眼钻孔数量为 256 个, 每平方米炮眼数量为 1.94 个, 满足施工规范每平方米布设炮眼个数 $1.5 \sim 2.0$ 个的要求。经多循环统计分析, 单位炸药消耗量平均值为 0.88 kg/m^3 , 符合光面爆破单位炸药消耗量相关控制标准。

5 结论

瓦浪隧道为实现不同围岩采用不同爆破参数施工目的,基于围岩实时反馈技术,通过采用双曲臂凿岩机安装超声波测量仪及相关测量设备,实时监测围岩变

- 防疫车设计[J].现代信息科技,2023(17):141-144.

[2] 韩丹.自动驾驶中基于多传感器融合的目标检测分析[J].企业科技与发展,2024(1):95-97.

[3] 任伟建,高强,康朝海,等.移动机器人同步定位与建图技术综述[J].计算机测量与控制,2022(2):1-10.

[4] 冯洲,续欣莹,郑宇轩,等.动态场景下基于实例分割和三维重建的多物体单目SLAM[J].仪器仪表学报,2023(8):51-62.

[5] 丛佩超,崔利营,万现全,等.基于改进ORB-SLAM2的果园喷药机器人定位与稠密建图算法[J].农业机械学报,2023(7):45-55.

[6] 孙龙龙,江明,焦传佳.基于运动矢量的改进视觉SLAM算法[J].电子测量与仪器学报,2020(9):23-31.

[7] 史涛,校诺政,丁垚,等.动态场景下融合改进YOLOv7的视觉SLAM算法[J].国外电子测量技术,2024(7):90-96.

[8] 于航,杨维鑫,李光雷,等.基于改进ORB-SLAM2的单目视觉算法[J].南方农机,2023(13):16-19.

[9] 李洋,程广伟,樊顺涛,等.误差融合技术的移动机器人SLAM算法研究[J].洛阳理工学院学报(自然科学版),2023(4):45-52.

[10] 赵浙栋,张成涛,李习刊,等.相机与激光雷达融合的道路目标检测研究[J].广西科技大学学报,2024(1):84-93.

(编辑:王霞)

化情况及钻孔精度，并及时优化现场爆破参数，有效提高了隧道爆破成型效果，减少了隧道超欠挖量，降低了初喷混凝土消耗，同时，采用机械化钻眼施工，显著提高了钻眼施工速度，降低了施工安全风险，为隧道爆破施工提供了良好指导。

参考文献：

- [1] 邢彪,张振.超大断面隧道光面爆破施工技术研究[J].低碳世界,2018(3):252-253.
 - [2] 许晓天.隧道爆破对围岩扰动技术研究[J].数字化用户,2023,29(18):118-120.
 - [3] 周智宇.深埋大跨度隧道开挖力学性能分析及快速施工工法研究[D].重庆:重庆交通大学,2021.
 - [4] 姚洪瑞.软弱围岩大断面隧道光面爆破[J].爆破,2020,37(2):42-47.
 - [5] 张俊兵.大断面硬岩隧道深孔掏槽光面爆破施工技术研究[C]//第十届全国工程爆破学术会议.第十届全国工程爆破学术会议论文集.广州:中国工程爆破协会,2012.

(编辑:王霞)