

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.02.025

激光雷达与编码器融合的叉车 AGV 定位算法研究

田浩杰,邱亚峰,严小虎,刘康,李前位

(南京理工大学,江苏 南京 210094)

摘要:针对叉车 AGV 在同步跟踪定位过程中误差大的问题,提出一种适用于室内叉车 AGV 的激光雷达与编码器互补融合的定位算法。该算法通过编码器采集的速度信息,构建互补滤波的加权函数,对雷达数据进行预处理,降低数据的畸变。对处理后的每帧数据进行特征匹配,重新定位得到当前轨迹的位姿信息。针对雷达数据采集的延时导致跟踪定位跳跃的问题,利用编码器数据对当前轨迹位姿进行后处理,进行互补法融合,从而实现对叉车 AGV 的全局定位跟踪。实验表明:在工作环境为狭长走廊空间的条件下,经过优化融合后其定位误差减少 47.79%。该方法的定位精度高、时间复杂度低,可满足低算力叉车 AGV 定位跟踪的需求。

关键词:激光雷达;编码器;互补滤波;跟踪定位;叉车 AGV

中图分类号:TN959 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2025)02-0131-04

Research on Forklift AGV Localization Algorithm with Fusion of Lidar and Encoder

TIAN Haojie, QIU Yafeng, YAN Xiaohu, LIU Kang, LI Qianwei

(Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: A laser radar and encoder complementary fusion positioning algorithm suitable for indoor forklift AGV is proposed to address the problem of large errors in the synchronization tracking and positioning process. The algorithm uses the velocity information collected by the encoder to construct a complementary filtering weighted function preprocessing the radar data and reducing data distortion. Feature matching is performed on the processed frame data to reposition the current trajectory's pose information. To address the issue of tracking position jumps caused by the delay in radar data acquisition, the encoder data is used for post-processing of the current trajectory's pose to achieve complementary fusion, thereby achieving global positioning and tracking of the forklift AGV. Experimental results show that under the conditions of a narrow and long corridor workspace, the optimized fusion method reduces positioning errors by 47.79%, and has high positioning accuracy and low time complexity, which meets the requirements of low-computing-power forklift AGV positioning and tracking.

Keywords: laser radar; encoder; complementary filter; tracking and positioning; forklift AGV

0 引言

随着红外技术和光学遥感技术的发展,激光导引技术已经成为目标检测、目标定位等众多领域的关键技术之一,广泛应用于无人驾驶、航空航天、船舶重工等诸多工业领域^[1]。激光雷达导引具有测量半径远、覆盖范围广和扫描周期短的特点,在车辆高速行驶或光线环境复杂的情况下,仍然可以获取精准的雷达点云数据^[2]。

随着近些年的发展,国内对于激光导引技术的研究已取得一些成果。文献[3]提出并设计了一种基于激光雷达和反光板技术的三边定位算法。文献[4]针对环境中结构信息较少的问题,提出一种基于惯性测量单元和激光雷达紧耦合的

混合匹配算法。文献[5]针对激光雷达 AGV 系统中反射板合理性问题,提出了利用水平因子来表征质量,通过合理地布设反射板的位置、数量提高 AGV 的定位精度。文献[6]针对现有激光雷达匹配定位在低特征点环境下的不足,提出一种基于二维码识别与激光雷达融合的定位方法。文献[7]针对视觉传感器在帧间配准和闭环检测较低的问题,提出一种误差模型并引进颜色变量对进行改进。通过研究发现:目前激光导引存在问题为惯性测量单元在长时间工作后会产生严重的漂移;二维码技术因其局限性不适合用在工业环境,视觉图像受到光线的影响较大,反光板限制了自动导引车的活动范围。

本文提出一种融合定位方法,其主要采用互

基金项目:国防预研基金项目(1171011485)

第一作者简介:田浩杰(1998—),男,河南商丘人,硕士研究生,研究方向为无人车定位导航技术,2801407021@qq.com。

补滤波原理和互补融合技术得到叉车 AGV 的轨迹位姿信息。在传统位姿估计的基础上,利用编码器数据进行航迹推演,得到雷达数据采集过程中的位姿变化,从而获取准确的全局位姿估计。

1 姿态融合定位

1.1 激光雷达原理

激光雷达是利用探测介质探测物体距离的设备,其主要由红外激光器、接收器、信号处理单元和旋转机构这 4 个核心组件构成^[8]。其测距定位是通过红外激光雷达发射出脉冲信号,脉冲信号碰到障碍物之后返回并被雷达接收。通过计算时间差得出雷达和障碍物的距离^[9]。激光定位因其超短时光脉冲的特性,即使在室外强光下也能实现稳定测距及高精度建图^[10],如图 1 所示。

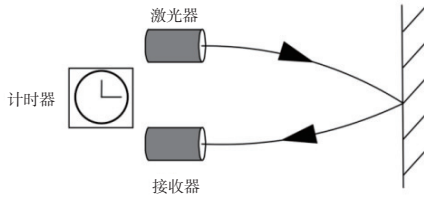


图 1 飞行测距法原理图

1.2 传统定位算法

不借助额外的传感器,只采用激光雷达数据对机器人的轨迹位姿进行估计,并利用估计的运动信息对雷达扫描数据进行补偿,这就是传统的纯估计的位姿计算方法。常用的求解方法是 ICP (iterative closest point) 算法。由于采集到的雷达点云数据存在畸变,直接使用含畸变的数据进行 ICP 运动估计,必然导致结果的偏差。所以在 ICP 的基础上又有了 VICP 的产生,其利用已有的位姿信息进行匀速假设,从而实现雷达数据畸变的矫正。

$$\bar{X}(i) = \{e^{(n-j)\Delta t(-V_i)} x_j | j=0, \dots, n\} \quad (1)$$

式中: $\bar{X}(i)$ 为去畸变后的第 i 帧数据; V_i 为机器人的速度。VICP 算法程序如下:

```

Vi = Vi-1
while ||V - Vi|| > ε do
  TΔt = eΔt(-Vi)
  for j = n : 1 do
    TjΔt = T(j-1)Δt TΔt
    xji = TjΔt xji
  end for

```

$$T = \text{ICP}(\bar{X}^{-1}, \bar{X}^i, T)$$

$$V = V_i$$

$$V_i = 1/\Delta \log T$$

end while

在传统 VICP 算法定义里,不需要借助激光雷达之外的传感器,系统简单。但其对机器人匀速假设在高频扫描周期下才成立,另外数据预处理和状态估计过程耦合,容易产生累积误差。

2 改进融合定位算法

2.1 互补滤波处理

激光雷达数据在采集过程中会受到温度、冲击等影响,导致数据产生抖动、毛刺之类的噪声,需要对雷达数据进行去噪处理^[11]。本文主要基于互补滤波原理,采用加权平均的思想^[12],利用编码器数据更新稳定的特点,对点云数据进行处理。

底盘在运动中,轮式编码器可以准确地反馈每个轮子的转速,经过前向运动学公式^[13]可以得到底盘的整体线速度和角速度:

$$\begin{bmatrix} v \\ w_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ -\frac{1}{d} & \frac{1}{d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_L \\ V_R \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: v 为底盘线速度; w_z 为底盘绕 z 轴角速度; d 为轮子直径; V_L 和 V_R 分别为底盘左、右两轮线速度。

编码器提供的位姿信息是一个相对值,与底盘上电启动时所处位置有关。相邻时刻的位姿变换可以通过对速度进行积分得到。实际情况下,相邻两个位姿的相隔时间很小,可以用累加运算替代。

$$p_k = p_{k-1} + \begin{bmatrix} v_{k-1} \\ w_{k-1} \end{bmatrix} \cdot \Delta t \quad (3)$$

式中: p_k 为编码器第 k 次位姿信息; p_{k-1} 为编码器第 $k-1$ 次位姿信息; v_{k-1} 为编码器第 $k-1$ 次速度; w_{k-1} 为编码器第 $k-1$ 次角速度; Δt 为时间间隔。

经过计算,可以得到轮式编码器在雷达扫描周期内采集到的位姿序点。通过极坐标转化公式得到在直角坐标系坐标:

$$p'_k = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \rho \cos \theta \\ \rho \sin \theta \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: p'_k 为编码器第 k 次时直角坐标; ρ 为极径长度; θ 为极角。

编码器在雷达扫描周期内采集到的位姿序点为 $\{p'_1, p'_2, p'_3, \dots, p'_k\}$; 雷达采集到的激光点云数据帧为 $\{x_1, x_2, x_3, \dots, x_m\}$ 。编码器采集的数据和雷达采集的数据之间存在个数不匹配和时间上不对齐的问题。为了使其一一对应,对机器人位姿序列进行二次曲线插值,构造二次插值基函数:

$$l_k(t) = \prod_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^k \frac{(t-t_j)}{(t_i-t_j)} \quad (5)$$

式中: $l_k(t)$ 为二次插值基函数; t_i 为雷达当前帧扫描周期内序列点对应的时间。

根据基函数构造出二次插值函数:

$$L(t) = p'_1 l_1(t) + p'_2 l_2(t) + \dots + p'_k l_k(t) \quad (6)$$

式中: $L(t)$ 为二次插值函数; p'_k 为编码器采集到的位姿序列点; t 为序列点对应在雷达当前帧扫描周期的时间点。

把雷达采集每个路标点信息的时间带入到二次插值函数,从而生成一组个数匹配和时间对齐的序列点。

$$p''_m = L(t_m) \quad (7)$$

式中: p''_m 为二次插值序列点; t_m 为雷达检测到 m 个路标点的时间。

由于编码器存在累积误差,采用互补滤波方式对其进行处理。互补滤波较其他滤波方法而言,在保证融合精度的基础上,运算量可大大降低,在一些中低端处理系统中得到广泛运用。构建互补滤波联合函数:

$$H_n(m) = \alpha_1 X_n(m) + \alpha_2 [H_n(m-1) - P''_n(m)] \quad (8)$$

式中: $H_n(m)$ 为第 n 次扫描周期第 m 个路标点滤波数据; α_1 和 α_2 为滤波系数; $X_n(m)$ 为激光雷达第 n 次扫描周期第 m 个路标点原始数据; $P''_n(m)$ 为编码器第 n 次扫描周期内获取的第 m 个插值序列点集; $H_n(m-1)$ 为上次滤波后输出值。

构建编码器和激光雷达的互补滤波联合函数是为了让激光雷达数据的误差达到最小化,进一步优化激光雷达点云数据,进而求解出叉车 AGV 的轨迹位姿。

2.2 数据融合

只利用雷达点云数据进行位姿估计,实现对叉车式 AGV 的定位,受雷达数据采集时间延时的影响,会导致畸变产生和跟踪定位不及时。采用两种传感器进行组合定位,利用编码器数据连续的特点,对叉车 AGV 位姿轨迹后处理。数据融合定位过程如图 2 所示。

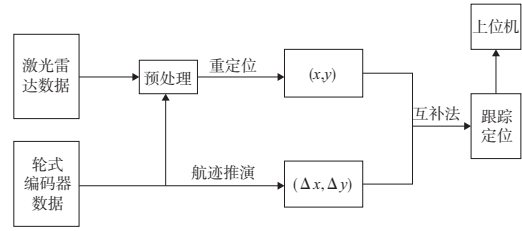


图2 数据融合定位过程图

在雷达扫描周期内 AGV 仍然持续运动,导致观测到每个路标点的观测信息与实际位姿信息不同。周期位姿变化如图 3 所示。

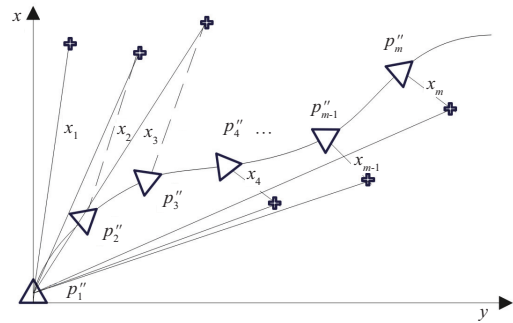


图3 周期位姿变化图

根据雷达定位原理可知,激光雷达测量机器人与多个路标点的相对位移,通过求解得到机器人的位姿信息。因此,根据路标点、机器人坐标和全局坐标系的矢量关系,建立矫正后的位姿方程:

$$x'(m) = p''_m + x_m \quad (9)$$

式中: $x'(m)$ 为位姿数据; p''_m 为编码器插值得到序列点位姿; x_m 为原始数据。

针对激光雷达在扫描周期内的定位问题可以采用互补法解决。在雷达扫描周期内,利用编码器数据进行航迹推算,得到扫描周期内的位姿估计。二者进行叠加,实现对叉车式 AGV 的全局定位跟踪。

激光雷达的扫描频率低于编码器的脉冲反馈频率。在 t_0 时刻,根据雷达采集到的点云数据重定位可知 AGV 所处位置的世界坐标为 $W(x_0, y_0)$ 。在雷达的扫描周期 $t_0 \sim t_2$ 之间,雷达所获得的位姿信息不变,编码器采集到多次位姿变化。在扫描周期的位姿变化可通过轮式编码器计算得到:

$$x_w = x_0 + \int_{t_0}^{t_2} v_x dt \quad (10)$$

$$y_w = y_0 + \int_{t_0}^{t_2} v_y dt \quad (11)$$

式中: x_w 和 y_w 为融合后的全局位姿坐标; x_0 和 y_0

为激光点云数据帧匹配的世界坐标; v_x 和 v_y 分别为轮式编码器反馈的机器人 x 和 y 方向的速度; t_2 为红外激光雷达扫描周期结束时刻; t_0 为红外激光雷达扫描周期开始时刻。

融合后的位姿初始值为激光雷达状态估计的位姿,周期内的位姿估计是由编码器数据解算得到,通过融合实现了更加符合真实运动的全局定位跟踪。

3 实验验证

本文使用安装有思岚 S2 单线红外激光雷达和增量式编码器的叉车式 AGV 平台进行实验。红外激光雷达的性能参数如表 1 所示。电机采用 SSTS1C500 伺服电机,其带有增量式编码器并支持标准的 Modbus RTU 协议,可通过 USB 转 RS485 转换器与伺服连接。上位机可以借助 ServoTuner 软件,通过串口通信读写编码器数据。

表 1 红外激光雷达性能参数

参数	数值
测量半径/m	0.05~30.00
通信频率/MHz	1
采样频率/kHz	32
角分辨率/(°)	0.12
机械尺寸/mm	77.00×77.00×38.85
供电电压/V	5
扫描范围/(°)	360
测距精度/cm	±3

实验开始前,AGV 基于 Cartographer 算法建立实验室走廊的二维栅格地图,保存作为已知地图用于 AGV 运动过程中的重定位,如图 4 所示。实验开始,叉车式 AGV 按照预定轨迹,进行行走。在运动过程结束后保存雷达点云数据和增量式编码器速度信息。

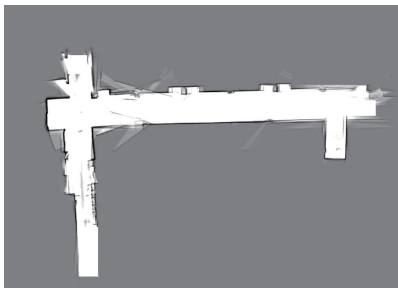


图 4 二维栅格地图

基于互补滤波,对雷达数据进行处理得到去噪之后的数据,得到其位姿信息。建立对比分析图,如图 5 所示。采用数据融合算法,分别计算出单激光雷达定位和二者数据融合两种不同方式定位出的位姿信息,建立对比分析图,如图 6 所示。

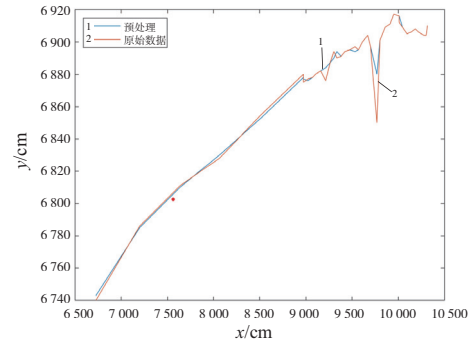


图 5 对比分析图

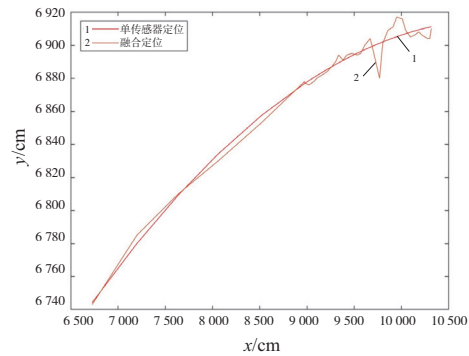


图 6 互补融合法

通过仿真实验对比,去噪后的数据更加平缓,减小了位姿跟踪的突变现象,定位更加可靠,改善了激光点云数据的漂移现象。首先将 3 种算法估计的起点位姿和实际的起点位姿进行对齐,然后将 3 种算法估计的终点坐标与实际给出的终点坐标进行对比,将估计的位姿轨迹与实际轨迹进行对比,计算出累积误差。从表 2 中可以看出融合匹配算法的累积误差相较于纯估计定位算法的累积误差降低 47.79%,相较于编码器定位算法的累积误差降低 67.00%。综合来看,本文提出的融合算法能够提高叉车 AGV 的定位精度,达到了预期的目的。

表 2 累积误差对比 单位:mm

算法	x 方向	y 方向	位置偏差
纯估计定位	3.902 0	6.620 1	7.684 4
编码器定位	7.875 0	9.178 0	12.159 0
融合算法	2.448 0	3.178 0	4.011 5

(下转第 151 页)

- [6] 罗家豪,王大鹏. 基于VMD和AP聚类的结构损伤识别方法[J]. 电子测量技术,2022,45(17):51-55.
- [7] WU L W, ZHANG Y P, ZHAO Y Q, et al. Mode mixing suppression algorithm for empirical mode decomposition based on self-filtering method[J]. Radioelectronics and Communications Systems, 2019, 62(9):462-473.
- [8] LI H, WU X, LIU T, et al. Composite fault diagnosis for rolling bearing based on parameter-optimized VMD[J]. Measurement, 2022, 201:111637.
- [9] JIANG X X, SHEN C Q, SHI J J, et al. Initial center frequency-guided VMD for fault diagnosis of rotating machines[J]. Journal of Sound and Vibration, 2018, 435:36-55.
- [10] 朱玥,王平,张兆珩,等. 基于最小熵解卷积的轨面缺陷漏磁信号处理[J]. 电子测量技术,2022,45(17):167-170.
- [11] MCDONALD G L, ZHAO Q, ZUO M J. Maximum correlated kurtosis deconvolution and application on gear tooth chip fault detection[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2012, 33:237-255.
- [12] 孙敬昂,孙文磊,许华超. 大型风力发电机组齿轮劣化故障诊断研究[J]. 机械设计与制造, 2018(9):101-104.
- [13] 冷军发,荆双喜,王志阳,等. MCKD最佳故障周期搜索的齿轮箱故障特征提取[J]. 机械科学与技术, 2018, 37(1):36-42.
- [14] 刘尚坤,王家忠,王泽河,等. 改进MCKD方法及轴承早期故障诊断研究[J]. 机械设计与制造, 2021(5):56-58.
- [15] 张洪梅,邹金慧. 自适应MCKD和CEEMDAN的滚动轴承微弱故障特征提取[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(4):79-86.
- [16] 张守京,慎明俊,杨静雯,等. 采用参数自适应最大相关峭度解卷积的滚动轴承故障特征提取[J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(3):75-83.
- [17] DRAGOMIRETSKIY K, ZOSSO D. Variational mode decomposition [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(3):531-544.

收稿日期:2023-06-29

(上接第134页)

4 结语

为实现叉车AGV的准确跟踪定位,以激光雷达定位为基础,结合增量式编码器采样率高和相对精度较高的特点,建立多传感器模型,提出了一种互补式数据融合优化定位算法。该算法基于插值思想和互补滤波技术,对定位过程中的雷达扫描数据进行前端去畸变和后端定位位姿互补融合处理,得到叉车式AGV的全局跟踪定位,有效改善了雷达数据精度不高和跟踪误差较大的缺点,提高了系统的定位精度。

参考文献:

- [1] 冯明驰,高小倩,汪静姝,等. 基于立体视觉与激光雷达的车辆目标外形位置融合算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(10):210-220.
- [2] 吴昊,石章松,吴中红. 基于机载激光雷达的目标定位误差特性分析[J]. 电光与控制, 2020, 27(4):20-25, 54.
- [3] 徐慧,孙宏图. 室内移动机器人激光雷达定位方法研究与仿真[J]. 机械设计与制造, 2022, 39(5):91-95.
- [4] 周志全,刘飞,屈婧婧,等. 基于IMU与激光雷达紧耦合的混合匹配算法[J]. 计算机系统应用, 2021, 30(11):203-209.
- [5] 刘文涛,朱洪涛,白慧丹,等. AGV激光导航中反射板

布设研究[J]. 激光与红外, 2022, 52(1):35-39.

- [6] 周宗锟,姜卫平,唐健,等. LiDAR地图匹配与二维码融合的AGV室内定位与导航[J]. 测绘通报, 2021(1):9-12, 52.
- [7] 罗磊. 基于激光与视觉的室内移动机器人导航技术研究[D]. 重庆:重庆邮电大学, 2020.
- [8] 张世乾. 基于多传感器融合的封闭环境语义地图研究[D]. 天津:天津科技大学, 2021.
- [9] 杨东辉,甄杰,隋心. 超宽带与激光雷达组合的室内定位方法[J]. 测绘科学, 2019, 44(6):72-78.
- [10] 赵旭,苏中,李连鹏,等. 脉冲激光飞行时间测距误差补偿技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(23):9-18.
- [11] 李航. 基于激光导航的叉车式AGV控制系统设计[D]. 成都:西华大学, 2021.
- [12] LIU M, CAI Y L, ZHANG L H, et al. Attitude estimation algorithm of portable mobile robot based on complementary filter [J]. Micromachines, 2021, 12(11):1373.
- [13] CAO M C, HU C, WANG J X, et al. Adaptive complementary filter-based post-impact control for independently-actuated and differentially-steered autonomous vehicles [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2020, 144:106852.

收稿日期:2023-07-19