

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2413637

基于二维激光 SLAM 和纯跟踪方法的单舵轮 AGV 高精定位和鲁棒控制方法*

侯君怡, 潘子豪, 余雷

(苏州大学机电工程学院 苏州 215000)

摘要:自动引导车(AGV)是实现智慧物流自动化装配的关键设备,其定位与运动控制的精度及鲁棒性直接决定了 AGV 运输系统的运行效率。而如何通过同时定位与建图技术(SLAM)进行 AGV 精准定位和鲁棒控制,避免传统 AGV 对二维码等固定标识的依赖提升场景应用泛化性,是当前 AGV 研究的关键问题。提出一种基于二维激光 SLAM 和纯跟踪方法的单舵轮 AGV 高精定位和鲁棒控制方法。考虑到单舵轮 AGV 的硬件结构和运输任务限制,将激光雷达架设在 AGV 顶部以最大程度获取环境信息。通过构建二维栅格地图作为系统定位基准,在室内结构化的场景中利用二维激光扫描快速定位 AGV 当前位置。采用基于预瞄距离的纯跟踪算法和柔性加减速方法对 AGV 进行车体控制与跟踪,实现平滑的路径跟踪曲线并提升长时间取送货任务的鲁棒性。实验验证中,对物流行业的真实室内环境进行了定位精度误差验证,激光算法在 2 000 次的激光定位结果中实现 ± 5 mm 的定位精度,直线轨迹跟踪精度在 25 mm,AGV 在 120 次的工作任务中的工作点重复定位精度在 ± 6 mm。系统在无标识环境中实现高精度与强鲁棒性,为工业 AGV 升级提供高精度低成本解决方案,助力现代物流柔性化与智能化发展。

关键词:自动引导车;物流智能化;二维激光定位;纯跟踪算法;柔性加减速

中图分类号: TH761 TP242.2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8

High-precision localization and robust control for single-steering-wheel AGV based on 2D laser SLAM and pure pursuit method

Hou Junyi, Pan Zihao, Yu Lei

(School of Mechanical And Electrical Engineering, Soochow University, Suzhou 215000, China)

Abstract: Automated guided vehicles (AGVs) play a crucial role in intelligent logistics, where localization accuracy and motion robustness directly impact system efficiency. A critical challenge in AGV research is achieving accurate localization and robust control using simultaneous localization and mapping (SLAM) while avoiding the reliance on fixed markers. This paper proposes a high-precision localization and robust control method for single-steering-wheel AGVs based on two-dimensional (2D) laser SLAM and a pure pursuit tracking approach. To enhance environmental perception, a laser sensor is mounted on top of the AGV, and a 2D occupancy grid map is constructed for localization in structured indoor environments. Motion control is achieved through a preview-distance-based pure pursuit algorithm combined with flexible acceleration-deceleration strategy, ensuring smooth trajectory tracking. Experimental validation in real-world indoor logistics environments demonstrates the system's accuracy, achieving a localization precision of ± 5 mm over 2 000 laser-based positioning instances, a straight-line trajectory tracking accuracy of 25 mm, and a repeatability precision of ± 6 mm across 120 task executions. The proposed system provides a high-precision, marker-free localization and control solution, supporting cost-effective AGV upgrades and advancing intelligent logistics.

Keywords: automatic guided vehicle; logistics intelligence; 2D laser positioning; pure pursuit method; flexible acceleration and deceleration

0 引言

随着现代物流发展规划的推进,现代物流作为供应链的重要支撑之一,如何实现物流智慧化成了主要的研究问题^[1-2]。其中,通过自动引导车(automatic guided vehicle, AGV)替代传统人力搬运是实现物流智慧化的关键研究,AGV能够自主移动和执行下发任务,实现现代仓库、工厂等室内结构化环境中的自动化搬运任务^[3-5]。

目前,AGV的主要导航定位方式分为磁导航、惯性导航、视觉导航和激光导航等方法^[6-11]。其中,磁导航通过应用环境铺设辅助设备,如金属线、磁条等,对地面具有较高的要求并需定期维护^[6]。惯性导航在长时间的工作任务下会不断累积误差导致定位漂移。视觉导航方法为了提升精度通常需要加装物理预设,且对光照敏感在结构化的场景中定位精度较低^[12]。而其中,基于激光定位与建图方法(simultaneous localization and mapping, SLAM)的方法由于能够快速获得结构化场景的探测因此具有显著优势^[13-17]。方德浩等^[13]对反光板圆心采用基于点距离进行数据分割并结合回波强度的方法,使用激光雷达回波算法提升了反光板位置的拟合精度。刘净轩等^[14]针对室外定位中可能出现的动态目标进行了消除,结合视觉信息实现二维激光在室外的精准定位。钱伟等^[17]采用一种激光雷达和全球导航卫星系统结合的方法,采用扩展卡尔曼滤波算法进行融合定位,在遮挡情况中通过里程计数据有效修正卫星数据偏差提升定位稳定性。

单舵轮 AGV 定位技术在智慧物流的典型室内结构化场景中应用时,采用无需加装物理标志的激光 SLAM 方法,具备更高的场景泛化性^[18]。二维激光导航方法能够为 AGV 提供高精度的环境感知能力,在获得当前 AGV 的全局坐标系下的位姿信息后,通过合理的车体控制方法控制叉车的运动速度和方向保证工作任务点的精准停靠。路径跟踪方法主要分为纯跟踪方法^[19]、比例积分微分控制方法^[20]、模糊控制方法^[21]和模型预测方法^[22]等。单舵轮 AGV 因具有高灵活性和高适应性的优势而被广泛使用在结构化厂区,且其设计简洁具有较高的可靠性。由于智慧物流更关注于工作点的定位精度,因此能够动态调整的纯跟踪算法能够更好的匹配 AGV,使其在结构化场景中更为高效鲁棒。

综上所述,针对物流行业内常见的结构化场景,开展了无需加装辅助设备的高精度二维激光单舵轮 AGV 的定位和路径跟踪的研究,实现了长时间的快速精准定位任务。系统主要优势为:1)提出一种基于二维激光 SLAM 和纯跟踪的单舵轮 AGV 定位和控制方法。将二维栅格地图作为系统建图基准,获得 AGV 在环境中的精

准实时定位。2)提出一种柔性加减速的方法,优化了路径直线和曲线的速度突变问题,实现平滑的路径跟踪;3)通过单舵轮 AGV 的路径跟踪实验验证,在 120 次的定位取送货任务中,得到最终的工作点重复定位精度在 $\pm 6 \text{ mm}$ 内,验证了系统多次重复定位算法具备很高的精准性和鲁棒性。

1 二维激光单舵轮 AGV 的定位与建图方法

自动化 AGV 叉车的长期特殊工作任务限制了传感器的安装位置,通过在 AGV 顶部加装二维激光雷达获取全局信息,实现高精建图与快速定位。

1.1 单舵轮 AGV 叉车运动学建模

单舵轮 AGV 的灵活机动性使其适应物流行业的众多应用场景,AGV 的底盘结构由一个主舵轮、两个万向轮和两组从动轮构成,如图 1 所示。

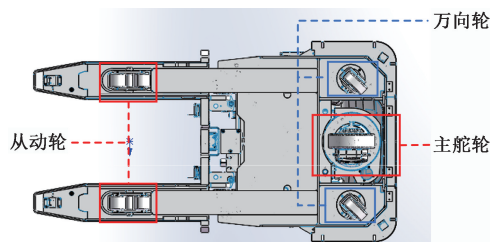


图1 单舵轮 AGV 底盘结构

Fig.1 Single wheel AGV chassis structure

在笛卡尔坐标系中进行运动学分析,AGV 位于 XOY 平面上,如图 2 所示。定义逆时针旋转为正,AGV 的面朝方向为 X 轴正方向。

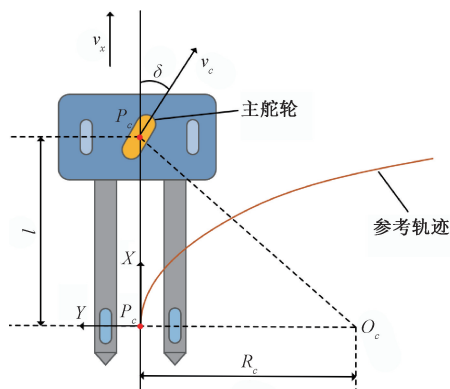


图2 单舵轮 AGV 运动模型

Fig.2 Single wheel AGV motion model

设 P_c 为主舵轮中心, P_o 为 AGV 中心轴线与辅助轮连接点,并定义其为 AGV 路径跟踪的控制参考点。 l 为 P_c 和 P_o 之间的距离,即主舵轮至辅助轮中心的距

离。 δ 是主舵轮相对于车辆中轴线的转向角。 v_c 是 AGV 当前的舵轮的线速度并指向前进的方向。

在 AGV 的实时控制中,以 O_c 为转动圆心的 AGV 瞬时转弯半径 R_c 为:

$$R_c = \frac{l}{\tan \delta} \quad (1)$$

采用的纯跟踪算法的控制原理是横向控制,具备良好的鲁棒性,因此求得 X 轴方向的瞬时速度 v_x , 即:

$$v_x = v_c \cos \delta \quad (2)$$

由式(1)和(2)可得当前位置的航向角速度 $\dot{\theta}$ 为:

$$\dot{\theta} = \frac{v}{R_c} = \frac{v_c}{l} \sin \delta \quad (3)$$

1.2 二维激光雷达室内高精建图与定位

二维激光雷达架在 AGV 顶部,如图 3 所示。这种方式使激光雷达能够最大程度地获取周边环境信息,并有效规避了许多潜在的遮挡障碍。

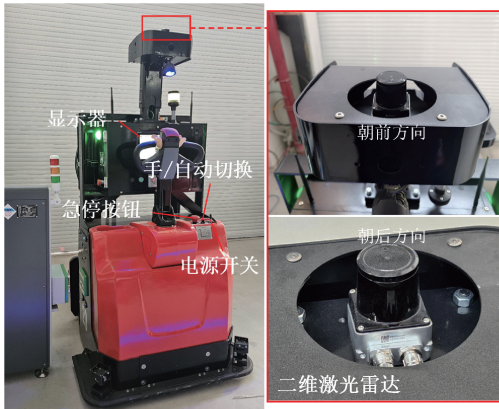


图3 单舵轮 AGV 与激光雷达局部放大图

Fig.3 Partial enlarged view of single wheel AGV and laser

设目标环境将其表示为计算机可理解的二维栅格地图 M 。二维激光雷达周期扫描环境生成距离数据,并转换为机器人坐标系中的点集,每个点对应探测到的物体位置。给定测量出的距离 d 和角度 θ ,在机器人坐标系中的探测到的点 $P_{robot}(x_r, y_r)$ 表示为:

$$\begin{cases} x_r = d \cos \theta \\ y_r = d \sin \theta \end{cases} \quad (4)$$

AGV 在世界坐标系下的位置信息 (X, Y) 和朝向 Φ 由激光里程计数据得出,则点 $P_{robot}(x_r, y_r)$ 转换到直接坐标系中的 $P_{world}(x_w, y_w)$ 表示为:

$$\begin{cases} x_w = X + x_r \cos \Phi - y_r \sin \Phi \\ y_w = Y + x_r \sin \Phi + y_r \cos \Phi \end{cases} \quad (5)$$

将世界坐标系中的 $P_{world}(x_w, y_w)$ 映射到二维栅格地图中的栅格 (i, j) 上,可得:

$$\begin{cases} i = \left\lfloor \frac{y_w}{h_g} \right\rfloor \\ j = \left\lfloor \frac{x_w}{w_g} \right\rfloor \end{cases} \quad (6)$$

其中, $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示向下取整, w_g 和 h_g 分别是栅格的宽度和高度。对于每一个栅格 $M_{i,j}$,可以分为两种状态,即空闲和占据。给定传感器在 t 时刻的观测 Z_t 和 AGV 的未知 X_t ,通过 $P(M_{i,j})$ 存储状态值,来表征该区域内是否被占据。当获得新的传感器测量 Z_t 时,栅格 $M_{i,j}$ 占据或空闲的概率为:

$$P_{occ}(M_{i,j}) = f(P_{occ}(M_{i,j}), Z_t, X_t) \quad (7)$$

其中, $P_{occ} \in [0, 1]$, 接近 1 表示为高概率被占据,接近 0 表示空闲或是未知。 f 是更新函数,通过新的测量值和传感器位置来更新栅格的占据概率。在接受到新的测量 Z_t 后,通过逆传感器模型 $P(Z_t | M_{i,j}, X_t)$ 来更新地图上每个栅格被占据的概率 $P_{occ}(M_{i,j})$,通过贝叶斯规则更新栅格的状态。

$$P(M_{i,j} | Z_t, X_t) = \frac{P(Z_t | M_{i,j}, X_t) \cdot P(M_{i,j})}{P(Z_t | X_t)} \quad (8)$$

其中, $P(M_{i,j} | Z_t, X_t)$ 是栅格 $M_{i,j}$ 被占据的后验概率。 $P(Z_t | M_{i,j}, X_t)$ 是给定栅格 $M_{i,j}$ 被占据和 AGV 位置 X_t 时观测到 Z_t 的概率。 $P(M_{i,j})$ 是栅格 $M_{i,j}$ 被占据的先验概率。 $P(Z_t | X_t)$ 是观测数据的边缘概率,通常为归一化常数,确保所有的概率之和为 1。

采用二维激光进行高精建图和实时定位,二维激光 SLAM 中每一帧点云中的所有点都可以参与运算以保证鲁棒定位性能。

2 AGV 路径跟踪与车体控制方法

在对结构化场景进行精准二维栅格建图后,后续相同场景中的相同工作任务能够以该地图作为初值基准来实时定位并进行路径规划,以提升点对点的工作任务的定位精度。

2.1 基于预瞄距离的纯跟踪方法

纯跟踪算法关注点对点的工作点的鲁棒性和精准性,通过计算当前 AGV 位置与路径目标点的几何关系,动态调整转向角度,以实现精准路径跟踪。基于阿克曼转向几何模型,将 AGV 简化为单车模型,以优化转向控制和轨迹跟随,增强其在不同路径条件下的适应性和控制精度,如图 4 所示。

以 AGV 的控制参考点 P_o 作为当前车体位置,当前位置与目标点 G 之间的预瞄距离为 L ,当前朝向与到达目标点的预瞄角为 α ,车辆的转向半径为 R 。根据几何关系可得:

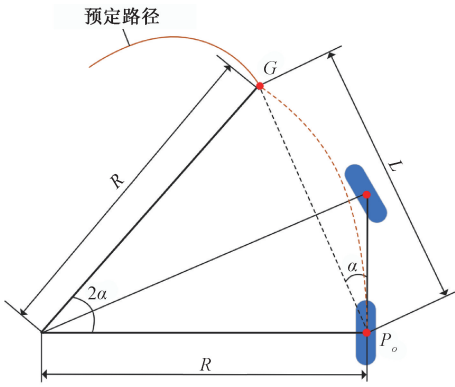


图4 基于预瞄距离的车体跟踪方法

Fig. 4 Vehicle tracking method based on preview distance

$$R = \frac{L}{2\sin \alpha} \quad (9)$$

其中,当目标点在 AGV 左侧时 $\alpha > 0$,反之则 $\alpha < 0$ 。单车模型通过以合适的转向角 δ 运动,使得 AGV 后轴中心 P_0 通过目标点 G 。根据阿克曼转向原理并结合式(1),可得期望转向角 δ 为:

$$\delta = \arctan\left(\frac{2L\sin \alpha}{L}\right) \quad (10)$$

定义当前 AGV 相对于目标点 G 有横向偏差 e_y ,结合预瞄距离 L 可得:

$$\sin \alpha = \frac{e_y}{L} \quad (11)$$

通常期望转向角是一个小角度,因此 t 时刻的横向偏差 e_y 可由式(12)近似得到:

$$e_y \approx \frac{L^2}{2l}\delta(t) \quad (12)$$

其中, $\delta(t)$ 是 t 时刻下的期望转向角。由式(12)可得,横向误差 e_y 与期望转向角呈正相关,实际 AGV 的跟踪效果很大程度受预瞄距离 L 影响。预瞄距离表示 AGV 纵向的线速度形式,即:

$$L = \lambda v_x + c \quad (13)$$

其中, λ 为比例系数, c 为基础预瞄距离常数。预瞄距离 L 会随着车辆速度的增加而增加,这是由于在高速行驶中 AGV 需要更长的反应距离来适应路径的变化。考虑交互环境的安全性等因素,将 AGV 的最大速度 $v_{\max}$ 限制在 1.2 m/s,由此设定 λ 为 0.87, c 为 0.3,在不同的应用场景中需设置不同的调节参数。

2.2 AGV 柔性加减速控制方法

传统直线加减速易引发冲击和振动,通过柔性加减速可使 AGV 平稳启动与停止,提升长时间鲁棒控制效果。柔性加减速与传统的 T 形加速不同,加减速被分为 7 段时间段过程,如图 5 所示。

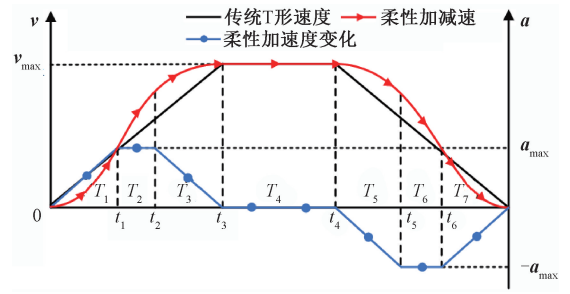


图5 柔性加减速与 T 形加减速对比

Fig. 5 Comparison between flexible acceleration/deceleration and T-shaped acceleration/deceleration

图 5 中实线为传统 T 形速度曲线,三角线为柔性加减速速度变化曲线,圆点线为柔性曲线的加减速随时间变化关系, $T_k = t_k - t_{k-1}$ ($k = 1, 2, \dots, 7$)。

柔性加减速过程中的加速度 a 会随着进程而变化,给定变量加加速度 J 为:

$$J = \frac{da}{dt} \quad (14)$$

根据 7 段加减速,可以得到加速度随时间进程变化的关系为:

$$a(t) = \begin{cases} Jt, & 0 < t \leq t_1 \\ a_{\max}, & t_1 < t \leq t_2 \\ a_{\max} - J(t - t_2), & t_2 < t \leq t_3 \\ 0, & t_3 < t \leq t_4 \\ -J(t - t_4), & t_4 < t \leq t_5 \\ -a_{\max}, & t_5 < t \leq t_6 \\ -a_{\max} - J(t - t_6), & t_6 < t \leq t_7 \end{cases} \quad (15)$$

速度与加速度满足关系 $v = at$,速度与加加速度满足关系 $v = 1/2(Jt^2)$,可推导得到位移 S 与时间关系为:

$$S = \int_0^t \frac{1}{2}Jt^2 dt = \frac{1}{6}Jt^3 \Big|_0^t \quad (16)$$

由此,确定了系统最大速度 $v_{\max}$,最大加速度 $a_{\max}$ 和加加速度 J 即可确定整个柔性加减速的运动过程。加加速度 J 反映着系统的整体柔性,柔性越大过冲越大,运行时间越短。

在一个完整的柔性加减速过程 T_f 中需要运行过程中能够达到最大速度 $v_{\max}$,且理想状态下 $T_1 = T_3 = T_5 = T_7$ 。根据时间过程与速度和加速度的关系,设存在 T_2 ,则根据上式速度与时间的关系可得最大速度 $v_{\max}$ 为:

$$v_{\max} = \frac{1}{2}JT_1^2 + a_{\max}T_2 + \frac{1}{2}T_1^2 = JT_1^2 + a_{\max}T_2 \quad (17)$$

又因为 $a_{\max} = JT_1$,得到 T_2 表达式为:

$$T_2 = T_6 = \frac{v_{\max} - v_0}{a_{\max}} - T_1 \quad (18)$$

其中, v_0 为 AGV 的初始速度。在给定总体运行时间 T_f 的情况下, T_4 可以推导得到:

$$T_4 = T_f - 2T_2 - 4T_1 = T_f - 2\frac{v_{\max}}{a_{\max}} - 2\frac{a_{\max}}{J} \quad (19)$$

加加速度 J 可以由总体运行时间 T_f 下的总路程 S_0 得到:

$$J = \frac{a_{\max}^2 v_{\max}}{v_{\max} a_{\max} T_f - S_0 a_{\max}} \quad (20)$$

根据上述柔性加减速在加速和减速阶段控制加加速度的过程,能够降低速度突变带来的影响实现平滑的车体速度控制效果。

3 实验验证

实验测试在改装后的搬运通叉车上进行,最大车辆速度被限定在 1.2 m/s,最大预瞄距离 3 m,最小预瞄距离 0.3 m。首先验证二维激光 SLAM 静态定位精度,随后给出二维栅格地图下的运行轨迹,最后给出了实际工作站点的多次重复精度定位,验证了单舵轮 AGV 激光定位系统在智慧物流中的精确性和鲁棒性。

3.1 AGV 二维激光静态定位精度

为了验证 AGV 在静止状态下的定位精度,选取了 2 000 组定位结果来验证静态激光 SLAM 的定位精度。真实场景下的实际坐标值为 (35 189, 32 392), X 和 Y 轴的定位结果如图 6 所示。坐标轴 X 轴为定位结果单位是毫米(mm),左侧坐标轴 Y 轴为不同定位结果位置的计数,右侧 Y 轴为总的定位结果序号,图 6 中的圆点表示定位结果。

如图 6 所示, X 轴上的定位结果绝大多数落在 (35 186, 35 192), 即 ± 3 mm 区间, 仅 0.5% 左右结果不在区间范围内。 Y 轴定位结果大多落在 (32 388, 32 396) 区间, 即 ± 4 mm 区间, 仅 0.95% 左右结果不在区间范围内。

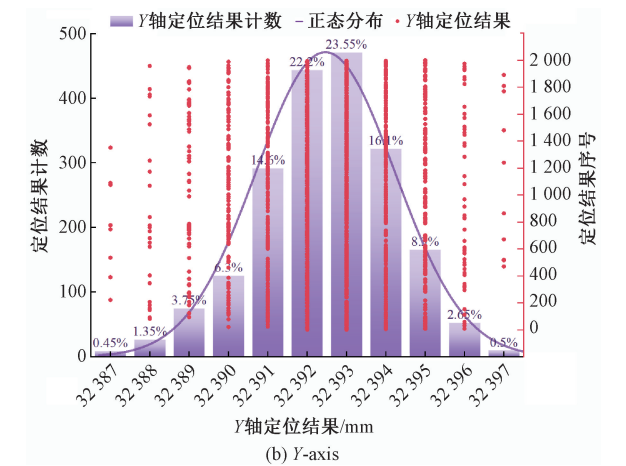
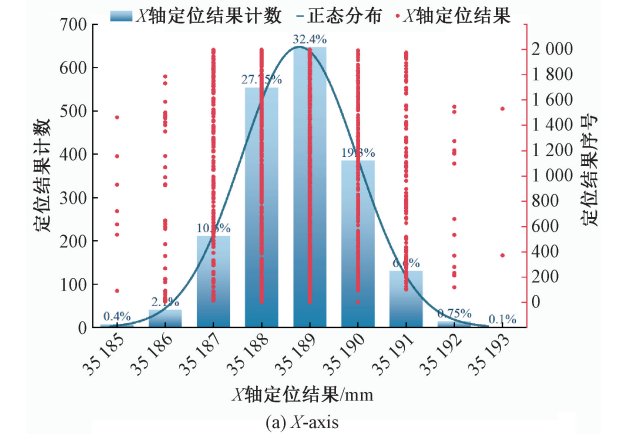


图 6 X 和 Y 轴的静态激光定位误差结果
Fig. 6 Static laser positioning results on the X -axis and Y -axis

为了更好的验证二维激光静态定位精度,将得到的静态定位结果与实际坐标进行误差对比,如表 1 所示。表 1 中采用的性能指标如下:均方根误差 (root mean square error, RMSE), 标准偏差 (standard deviation, SD), 最大定位误差 (maximum absolute error, Max), 平均绝对误差 (mean absolute error, MAE), 均方误差 (mean squared error, MSE)。

表 1 X 和 Y 轴的静态激光定位误差结果分析

Table 1 Analysis of static Laser positioning error results for X-axis and Y-axis (mm)		
性能指标	X 轴静态定位结果	Y 轴静态定位结果
RMSE	1.223	1.825 0
SD	1.203	1.766 0
MAE	0.920	1.413 5
MSE	1.495	3.329 5
Max	4.000	6.000 0

根据表 1 中的 2 000 组定位数据, X 和 Y 轴方向上的静态定位结果展现出了高可靠性, 误差结果 RMSE 不超过 2 mm, SD 和 RMSE 量级相近, 反映定位结果系统性偏差很小, 具有很高的鲁棒性和精确性。大部分定位结果均在 5 mm 误差范围内, X 轴方向上的最大误差为 4 mm, Y 轴的最大误差出现了少量的 6 mm, 但仅占 2 000 组数据中的 5 组占比 0.25%, 根据高斯 3σ 原则, 说明所提激光雷达的定位算法精度达到 ± 5 mm。

综上, 说明所提激光雷达的定位算法精度能够达到 ± 5 mm, 完全覆盖工业应用场景需求。

3.2 二维栅格地图与 AGV 运行轨迹

将单舵轮 AGV 放至实际应用场景中建图以验证建图效果,如图 7 所示。图 7 中某物流地图最长处 74.84 m,宽 26.66 m。

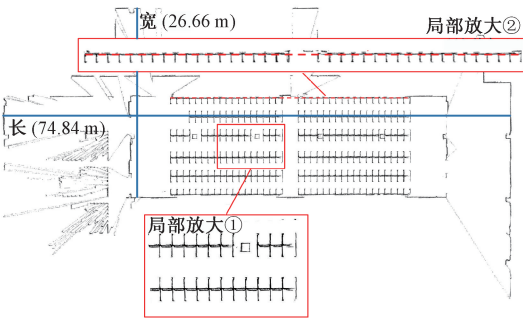


图 7 某物流厂区二维栅格地图

Fig. 7 2D grid map of a logistics factory area

局部放大图 7-①中的货架摆放整齐、排列有序不存在错层或是误匹配的情况。并选取厂房的长一侧作为放大基准,以局部放大中的虚线作为结构参考,验证二维激光单舵轮 AGV 建图的精准性。

根据放大的局部图 7-②可知,基于二维激光雷达的建图方法在多人造结构的场景中表现出优良的性能。在二维栅格地图中绘制 AGV 的运动轨迹,并局部放大查看轨迹跟踪结果, P 为设置的工作站点。如图 8 是在栅格地图中的 AGV 工作任务的 3 次运动轨迹。

图 8 可以看到 AGV 在二维地图的基准中能够实时获得精准定位,重复多次均能获得平滑的运动。

根据站点的标注信息将运动轨迹分为直线运动、曲线运动,并在 3.3 节中对工作点的重复定位精度进行了验证。为了更好的验证轨迹跟踪的鲁棒性,表 2 选取了 3 次轨迹测量并截取其中的直线运动轨迹的定位精度分析,单位是米(m)。

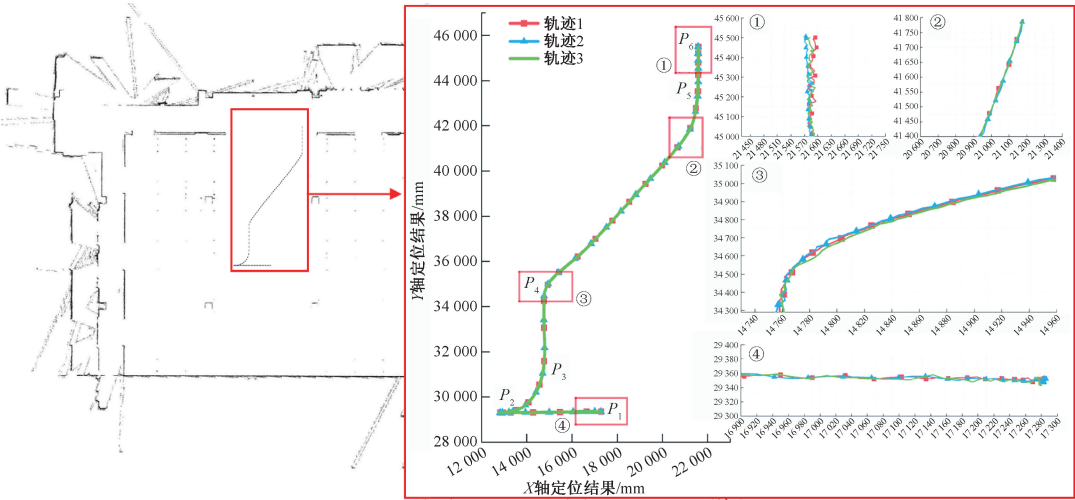


图 8 某物流厂区二维栅格地图

Fig. 8 AGV trajectory in a 2D grid map

表 2 直线运动的规划路径与实际路径分析

Table 2 Analysis of the planned path and actual path for linear motion (m)								
工作站点	规划值		轨迹 1		轨迹 2		轨迹 3	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
起始点 P_1	17.28	29.35	17.28	29.35	17.28	29.35	17.28	29.35
转向点 P_2	12.77	29.32	12.77	29.31	12.78	29.32	12.78	29.32
MAE	—		0.010		0.020		0.012	
RMSE	—		0.019		0.025		0.022	

根据表 2 数据可知,单舵轮 AGV 的路径跟踪算法的均方根误差在 25 mm 内,这一结果表明,基于预瞄距离和柔性加减速的路径跟踪算法能够有效地控制 AGV 的运动精度,在叉车的直线运动过程中,能够较好地减小偏

差,确保了较高的路径跟踪精度。表 3 所示为 P_2 到 P_3 的曲线运动路径跟踪误差分析。

表 3 曲线运动的规划路径与实际路径分析

Table 3 Analysis of the planned path and actual path for curved motion (m)			
性能指标	轨迹 1	轨迹 2	轨迹 3
MAE	0.015	0.022	0.018
RMSE	0.026	0.035	0.027

根据表 3 数据得到了 3 次轨迹跟踪下的曲线运动轨迹误差,路径跟踪的均方根误差在 35 mm 内,验证了单舵轮 AGV 系统在结构化的厂区中能够高效地运行曲线路径跟踪,具有较小的路径误差。

3.3 工作站点的重复定位精度

为了测量 AGV 在实际工作任务中的重复站点定位精度,将一个十字激光笔通过机械固件将其固定在叉齿一侧,通过十字激光线投射到地面的定位激光板上从而确定 AGV 位置,如图 9 所示。

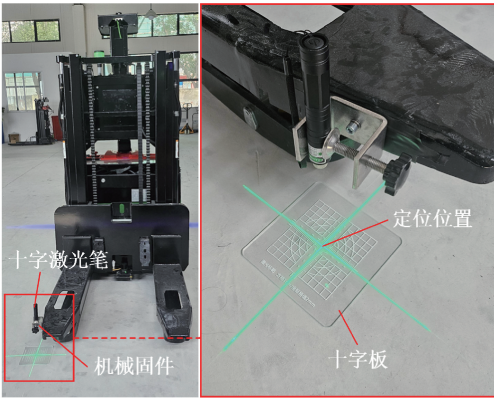


图 9 激光 AGV 十字激光准星定位

Fig. 9 Laser AGV with cross laser sighting positioning

工作站点的重复精度能够直接反映出 AGV 的停靠位置是否符合预期,通过激光十字准星在十字板上的位置确定,记录了 120 次的工作定位结果,如图 10 中圆点所示,精度单位是毫米(mm)。

图 10 中,AGV 的工作点重复定位能够被半径为 6 mm 的圆包裹,由此说明 AGV 在工作点重复定位任务中,重复定位精度能够达到 ± 6 mm。为了更好的验证工作点的重复定位精度,对 X 和 Y 轴的定位结果以及整体 RMSE 进行分析,如表 4 所示。

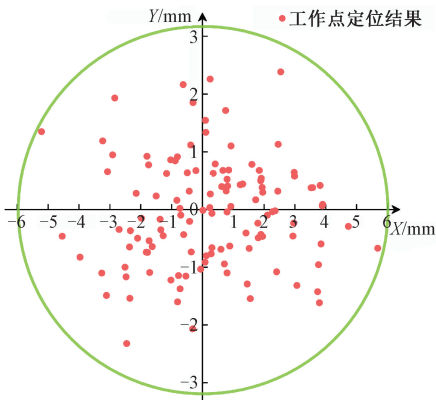


图 10 工作点重复定位精度

Fig. 10 Repositioning accuracy of the working point

表 4 数据表明,工作点重复定位结果的平面 RMSE 为 2.32 mm,具有高精度性。最大误差为 5.682 mm,且综合图 10 可以看出,120 组定位结果均在 ± 6 mm 误差范围内,验证了系统在室内环境下的高精度与稳定性。

表 4 工作点重复定位精度结果分析

Table 4 Analysis of repeated positioning accuracy at working point (mm)

性能指标	X 轴定位结果	Y 轴定位结果
RMSE	2.121	0.929
SD	2.105	0.927
MSE	4.499	0.863
MAE	1.715	0.754
Max	5.682	2.383
平面重复定位 RMSE		2.320

经过实际的多次验证,证明了提出的基于二维激光的单舵轮 AGV 叉车算法在物流行业的室内结构化场景中具有很高的精准性和鲁棒性。

4 结 论

针对智慧物流行业的结构化场景特性,开展了基于二维激光 SLAM 和纯跟踪方法的单舵轮 AGV 高精度定位和鲁棒控制方法研究。在无预先物理标记的条件下实现 AGV 的精准定位和鲁棒控制。通过采用二维栅格地图作为建图基准,结合基于预瞄距离的纯跟踪算法和柔性加减速方法,有效地对 AGV 进行车体控制与跟踪,提升了长时间执行取送货任务的鲁棒性。在实验验证方面,对智慧物流行业的室内环境进行了高精度建图,并通过 2 000 次的激光定位实验,验证了激光算法的定位精度达到 ± 5 mm。直线路径跟踪精度在 25 mm 内。在 120 次的工作任务中,AGV 展现出了在 ± 6 mm 内的重复定位精度。进一步证明了采用激光传感器定位与建图技术,为在智慧物流行业 AGV 的高效运作提供有力的技术支撑,具有广阔的应用前景和实际价值。

参考文献

[1] 王耀南,江一鸣,姜娇,等. 机器人感知与控制关键技术及其智能制造应用[J]. 自动化学报, 2023, 49(3): 494-513.
WANG Y N, JIANG Y M, JIANG J, et al. Key technologies of robot perception and control and their applications in intelligent manufacturing [J]. Acta Automatica Sinica, 2023, 49(3): 494-513.
[2] 王子实,吴耀华. 基于差分进化算法的 FMS 中机器与多载 AGV 调度[J]. 控制与决策, 2024, 39(9): 3108-3116.
WANG Z SH, WU Y H. Machine and multi-load AGV scheduling in FMS based on differential evolution algorithm[J]. Control and Decision, 2024,39(9):3108-

- 3116.
- [3] 范厚明, 郭振峰, 岳丽君, 等. 考虑能耗节约的集装箱码头双小车岸桥与 AGV 联合配置及调度优化[J]. 自动化学报, 2021, 47(10): 2412-2426.
- FAN H M, GUO ZH F, YUE L J, et al. Joint configuration and scheduling optimization of twin-vehicle quay crane and AGV in container terminals considering energy conservation[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2021, 47(10): 2412-2426.
- [4] ZHANG R D, CHAI R Q, CHAI S CH, et al. Design and practical implementation of a high efficiency two-layer trajectory planning method for AGV [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2024, 71(2): 1811-1822.
- [5] 肖金壮, 余雪乐, 周刚, 等. 一种面向室内 AGV 路径规划的改进蚁群算法[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(3): 277-285.
- XIAO J ZH, YU X L, ZHOU G, et al. An improved ant colony algorithm for indoor AGV path planning [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2022, 43(3): 277-285.
- [6] GOZICK B, SUBBU K P, DANTU R, et al. Magnetic maps for indoor navigation[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2011, 60(12): 3883-3891.
- [7] 李春磊, 陈久朋, 伞红军, 等. 基于多传感器的紧耦合三维室内定位与建图[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(7): 121-131.
- LI CH L, CHEN J P, SAN H J, et al. Tight-coupling 3D indoor localization and mapping based on multi-sensor fusion [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2024, 45(7): 121-131.
- [8] YU R R, ZHAO H, ZHEN SH CH, et al. A novel trajectory tracking control of AGV based on udwadia-kalaba approach[J]. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2024, 11(4): 1069-1071.
- [9] 陈昌川, 全锐杨, 张谦, 等. 基于轻量化智能的多机协同 SLAM 系统[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(12): 188-198.
- CHEN CH CH, QUAN R Y, ZHANG Q, et al. Multi-robot collaborative SLAM system based on lightweight intelligence[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2022, 43(12): 188-198.
- [10] KIM J. Trajectory generation of a two-wheeled mobile robot in an uncertain environment[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020, 67(7): 5586-5594.
- [11] 王铨彬, 李星星, 廖健驰, 等. 基于图优化的紧耦合双目视觉/惯性/激光雷达 SLAM 方法[J]. 测绘学报, 2022, 51(8): 1744-1756.
- WANG X B, LI X X, LIAO J CH, et al. Graph optimization-based tight-coupling stereo vision/inertial/LiDAR SLAM method [J]. *Journal of Geodesy and Cartography*, 2022, 51(8): 1744-1756.
- [12] 纪泽源, 于潇颖, 付文兴. 基于图神经网络特征点匹配的视觉 SLAM 算法[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(9): 34-43.
- JI Z Y, YU X Y, FU W X. Visual SLAM algorithm based on graph neural network feature point matching[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2024, 45(9): 34-43.
- [13] 方德浩, 许万, 陈幼平, 等. 基于激光雷达回波强度的反光板位置拟合方法[J]. 中国机械工程, 2021, 32(2): 204-211.
- FANG D H, XU W, CHEN Y P, et al. Reflector position fitting method based on LiDAR echo intensity[J]. *China Mechanical Engineering*, 2021, 32(2): 204-211.
- [14] 刘净轩, 王亮, 李和平, 等. 融合双目视觉和 2D 激光雷达的室外定位[J]. 控制与决策, 2023, 38(7): 1861-1868.
- LIU ZH X, WANG L, LI H P, et al. Outdoor localization based on the fusion of stereo vision and 2D LiDAR[J]. *Control and Decision*, 2023, 38(7): 1861-1868.
- [15] 陈耀华, 何丽, 王宏伟, 等. 基于可视点法剔除动态目标的激光-惯导 SLAM [J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(9): 248-256.
- CHEN Y H, HE L, WANG H W, et al. LiDAR-inertial SLAM based on visual point method for dynamic target removal[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44(9): 248-256.
- [16] ZHANG Y L, LI B, SUN SH J, et al. GCMVF-AGV: Globally consistent multiview visual-inertial fusion for AGV navigation in digital workshops[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2023, 72: 5030116.
- [17] 钱伟, 陈析, 陈鑫, 等. 基于里程计/LiDAR/GNSS 的室内外连续定位方法研究[J]. 传感技术学报, 2022, 35(4): 523-529.
- QIAN W, CHEN X, CHEN X, et al. Research on indoor

and outdoor continuous localization method based on odometer/LiDAR/GNSS [J]. Journal of Sensors and Technology, 2022, 35(4): 523-529.

- [18] ZOU Q, SUN Q, CHEN L, et al. A comparative analysis of LiDAR SLAM-based indoor navigation for autonomous vehicles[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(7): 6907-6921.
- [19] 靳欣宇, 张军, 刘元盛, 等. 基于Stanley算法的自适应最优预瞄模型研究[J]. 计算机工程, 2018, 44(7): 42-46.
- JIN X Y, ZHANG J, LIU Y SH, et al. Research on adaptive optimal lookahead model based on Stanley algorithm[J]. Computer Engineering, 2018, 44(7): 42-46.
- [20] 陈炫儒, 吴立飞, 杨晓忠. 基于改进麻雀搜索算法的分数阶PID参数整定[J]. 控制与决策, 2024, 39(4): 1177-1184.
- CHEN X R, WU L F, YANG X ZH. Fractional-order PID parameter tuning based on improved sparrow search algorithm[J]. Control and Decision, 2024, 39(4): 1177-1184.
- [21] VILLAGRA J. A comparison of control techniques for robust docking maneuvers of an AGV [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2012, 20(4): 1116-1123.
- [22] LI J CH, RAN M P, XIE L H. Design and experimental evaluation of a hierarchical controller for an autonomous ground vehicle with large uncertainties [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2022, 30(3): 1215-1227.

作者简介



侯君怡, 2018年于苏州大学获得学士学位, 2024年于苏州大学获得博士学位, 现为苏州大学在职博士后, 主要研究方向为车体控制、高精定位与建图。

E-mail: jyhou2018@163.com

Hou Junyi received her B. Sc. degree from Soochow University in 2018, received her Ph. D. degree from Soochow University in 2024. She is currently a postdoctoral researcher at Soochow University. Her main research interests include vehicle body control, robot localization and mapping.



潘子豪, 2021年于苏州大学获得学士学位, 现为苏州大学在校博士生, 主要研究方向为机器人定位、神经网络。

E-mail: 1337445350@qq.com

Pan Zihao received his B. Sc. degree from Soochow University in 2021. He is currently a doctoral student at Soochow University. His main research interests include robot localization and neural networks.



余雷(通信作者), 2005年于合肥工业大学获得学士学位, 2007年于合肥工业大学获得硕士学位, 2011年于东南大学获得博士学位, 现为苏州大学教授, 主要研究方向为自动控制系统、机器人导航。

E-mail: slender2008@163.com

Yu Lei (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Hefei University of Technology in 2005, received his M. Sc. degree from Hefei University of Technology in 2007, received his Ph. D. degree from Southeast University in 2011. He is currently a professor at Soochow University. His main research interests include automatic control systems and robot navigation.