

多传感器融合的智能仓储 AGV 导航控制与路径优化研究

孙健鹏

天津渤海职业技术学院, 天津 300000

DOI:10.61369/EPTSM.2025040009

摘要： 本文研究智能仓储 AGV 系统关键技术，探讨多传感器融合、导航控制及路径优化，并分析实际难题与解决办法。多传感器融合通过整合激光雷达、摄像头等数据，结合卡尔曼滤波等算法，提升 AGV 环境感知、定位精度与稳定性。基于该技术的导航控制借助 SLAM 算法实现定位与地图构建，结合分层架构调整策略；路径优化分析了算法适用性及改进方向。针对数据同步、实时性和稳定性问题，提出了相应解决方案。研究表明，多传感器融合与路径优化结合可显著提升 AGV 性能。

关键词： 智能仓储；AGV；多传感器融合；导航控制；路径优化

Research on Sensor Fusion-Based Navigation Control and Path Optimization for Intelligent Warehouse AGVs

Sun Jianpeng

Tianjin Bohai Vocational and Technical College, Tianjin 300000

Abstract： This paper investigates the key technologies of intelligent warehouse AGV systems, exploring multi-sensor fusion, navigation control, and path optimization, and analyzing practical challenges and solutions. Multi-sensor fusion enhances AGV environmental perception, positioning accuracy, and stability by integrating data from LiDAR, cameras, and other sensors, combined with algorithms such as Kalman filtering. Navigation control based on this technology utilizes SLAM algorithms for positioning and map building, incorporating a hierarchical architecture adjustment strategy. Path optimization analyzes algorithm applicability and directions for improvement. Solutions are proposed for data synchronization, real-time performance, and stability issues. The research demonstrates that the combination of multi-sensor fusion and path optimization can significantly enhance AGV performance.

Keywords： intelligent warehouse; AGV; multi-sensor fusion; navigation control; path optimization

引言

随着智能制造与物流发展，智能仓储对 AGV 需求迫切，其导航精度、环境适应力和效率影响仓储系统性能。但单一传感器有局限，如激光雷达难测透明物体、摄像头受光照影响，导致感知与定位不足；动态仓储布局和多 AGV 协同也对路径规划的实时性与最优性要求更高。为此，多传感器融合技术因数据互补性提升 AGV 感知与定位能力，高效导航控制和路径优化算法是其高效作业核心。本文聚焦智能仓储 AGV，分析多传感器融合原理与优势，探讨相关导航控制和路径优化策略，解决实际难题，为提升 AGV 性能提供参考。

一、多传感器融合技术

（一）常见传感器原理与特点

AGV 系统中，激光雷达、摄像头和红外传感器各有优势与局限。激光在探测方面具有直线传播特性以及优先的抗干扰能力，且具有较高的精度。所以在探测传感器方面，激光雷达是很好的选择。激光雷达的距离测量原理主要可以分为两种类型：三角测距法（如图1所示）与飞行时间法（如图2所示）。通常来说，使用飞行时间法的激光雷达测量精度较高，而使用三角测距法的激光雷达实现较为简便^[1]。

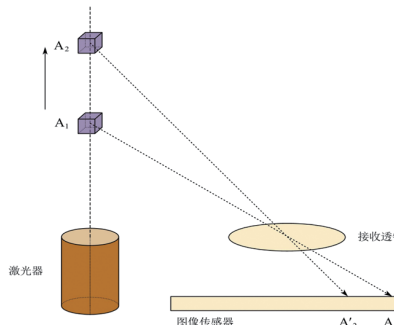


图1 激光雷达三角测距法

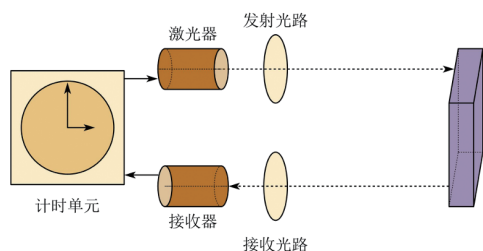


图2 激光雷达飞行时间测距法

摄像头依靠光学成像捕捉视觉信息转化为数字图像，在图像识别和环境感知上，能提取纹理、颜色等丰富信息，实现标志物识别与动态障碍物检测。但低光照下性能不佳，图像处理计算需求高，实时性受限。在 AGV 中，常与其他传感器结合，RGB-D 摄像头兼具二维图像与三维空间数据获取能力，增强环境认知。红外传感器基于红外线物理特性，通过检测目标红外辐射探测障碍物、测量距离，非接触式测量使其在近距离避障表现突出，对环境光敏感度低，可在黑暗中工作。不过，测量范围和精度受物体表面温度、发射率影响。在 AGV 系统中，主要用于近距离防碰撞检测，也可与其他传感器协同，提升系统可靠性。

（二）多传感器融合优势分析

多传感器融合技术整合激光雷达、摄像头等不同类型传感器数据，从环境感知、定位精度、系统稳定性等多维度提升 AGV 系统性能。各类传感器存在天然局限，如激光雷达虽测距精准却难以检测透明物体，摄像头图像识别能力强却易受光照干扰，而多传感器融合将它们的数据互补整合，可实现复杂环境下的全面感知。在定位精度方面，多源数据融合的 SLAM 算法优势显著。研究显示，相较于单一传感器定位，该算法能将定位误差控制在毫米级，满足智能仓储等场景对高精度定位的严苛要求^[2]。此外，多传感器融合赋予系统更强的鲁棒性，当某一传感器因故障或环境干扰失效时，其余传感器仍能持续提供有效信息，确保 AGV 系统稳定运行，避免因单点故障导致整体瘫痪。

（三）多传感器融合算法

多传感器融合算法是实现高效数据融合的关键，卡尔曼滤波和粒子滤波是其中常用方法。卡尔曼滤波基于线性系统模型，经预测和更新优化传感器数据融合，适用于动态环境下的实时定位与跟踪，但处理非线性系统能力不足，需结合扩展卡尔曼滤波或无味卡尔曼滤波改进。粒子滤波基于蒙特卡洛方法，通过随机采样粒子逼近系统状态后验概率分布，在非线性、非高斯噪声环境下的数据融合表现出色。在 AGV 导航系统中，卡尔曼滤波和粒子滤波常被用于融合激光雷达、摄像头等多源数据，实现高精度位姿估计与环境建模^[3]。此外，基于深度学习的融合方法正逐渐兴起，通过神经网络进行特征提取与联合优化，进一步提升融合效果。

二、基于多传感器融合的 AGV 导航控制

（一）SLAM 算法实现精准定位与地图构建

同时定位与地图构建（SLAM）算法是 AGV 导航技术核心，致力于解决机器人在未知环境中的定位与地图构建难题。其基于

传感器获取环境信息，结合机器人运动模型实现实时状态估计和环境建模^[4]。在多传感器融合框架下，SLAM 算法能有效利用激光雷达、摄像头和惯性测量单元等数据，提升定位精度与地图构建准确性。激光雷达凭借高精度距离测量构建环境几何结构，摄像头则通过图像识别补充语义信息，增强地图实用性。基于扩展卡尔曼滤波或粒子滤波的融合方法，可处理数据噪声与不确定性，提高定位和建图的鲁棒性。

在实际应用中，多传感器融合的 SLAM 算法面临诸多挑战。不同传感器数据需进行精确时间同步和空间配准，保证数据一致性与可用性；针对数据中的噪声干扰，动态加权、自适应滤波等方法可增强数据融合可靠性；引入闭环检测机制后，机器人重访已探索区域时能优化地图构建结果，进一步提升定位精度。这些关键技术相互配合，助力 AGV 在复杂仓储环境中实现高精度定位与地图构建，为后续导航任务筑牢根基。

（二）实时环境信息下的导航策略调整

在智能仓储环境中，AGV 需要根据实时获取的环境信息动态调整导航策略，以应对障碍物位置变化、货物存放情况更新等复杂场景。这一过程依赖于多传感器融合技术对环境信息的全面感知和精确处理。例如，通过激光雷达和深度相机的协同工作，AGV 能够实时检测前方障碍物的位置和形状，并基于此规划避障路径^[5]。此外，结合 RGB-D 摄像头和 AR 视觉标签的定位技术，可以进一步提高对环境变化的感知能力，确保 AGV 在动态环境中安全行驶。

为了实现高效的导航策略调整，AGV 通常采用分层控制架构，将全局路径规划与局部避障相结合。在全局层面，改进的萤火虫算法或其他启发式算法可用于生成从起点到终点的最优路径；而在局部层面，动态窗口法等反应式算法则负责根据实时环境信息调整机器人的运动轨迹。这种分层控制架构不仅提高了导航系统的灵活性，还显著增强了 AGV 对复杂环境的适应能力。实验结果表明，基于多传感器融合的导航策略调整方法能够在保证安全性的同时，有效缩短路径长度并减少规划时间，从而提升整体运行效率^[6]。

（三）导航控制系统设计与实现

基于多传感器融合的 AGV 导航控制系统由硬件和软件协同构成，实现高效稳定的导航功能。硬件层面，系统涵盖传感器模块、主控板与执行机构。传感器模块负责采集环境信息，激光雷达用于测距，深度相机进行三维重建，惯性测量单元完成姿态估计；主控板采用 Jeston Nano、STM32F4 等处理器，承担数据处理和决策；执行机构则根据主控板指令，驱动麦克纳姆轮等实现 AGV 多方向移动^[7]。此外，硬件设计需合理规划传感器布局，保障数据传输可靠性，充分发挥多传感器融合效能。

软件层面，导航控制系统基于机器人操作系统（ROS）开发，借助其模块化架构集成功能组件。系统分为感知、决策、执行三层：感知层采集并预处理传感器数据，决策层依据感知结果规划路径、调整导航策略，执行层将决策转化为控制指令。为提升实时性与稳定性，软件设计优化算法复杂度，并运用多线程处理机制。经实验验证，这种软硬件协同设计的导航控制系统，可在复杂仓储环境中实现高精度定位与高效路径跟踪，满足智能仓储对 AGV 导航性能的需求。

三、智能仓储 AGV 路径优化

（一）常见路径规划算法分析

在智能仓储中，路径规划算法直接影响 AGV 运行效率与任务质量。A* 算法作为经典启发式搜索算法，结合起点到当前节点实际代价与当前节点到目标节点估计代价，能快速找到较优路径。但在复杂仓储环境下，若启发函数设计不当，易偏离全局最优，且计算量会随环境复杂度大幅增加。Dijkstra 算法通过扩展最短路径树，虽能确保找到起点到各节点最短路径，却因计算复杂度高，在动态环境中实时性差，难以满足多 AGV 协同作业需求。遗传算法通过模拟生物进化实现全局优化，可在复杂环境中逼近全局最优解，但存在收敛慢、依赖初始种群，易出现求解耗时或陷入局部最优的问题^[8]。因此，在智能仓储中选择路径规划算法，需结合具体任务与仓储布局，综合考量路径优化效果、计算效率和环境适应性，以实现三者平衡。

（二）考虑仓储因素的路径优化影响

仓储布局、货物存放情况与 AGV 自身性能显著影响路径优化效果。仓储布局的复杂程度直接决定路径规划算法的搜索空间，在密集存储区域，AGV 避障频繁，这就要求路径规划算法具备强大的局部搜索能力，防止出现死锁或冲突^[9]。货物存放位置并非固定不变，其动态变化会改变仓储环境的可行路径，因此路径规划算法需要具备实时更新环境信息、重新计算最优路径的能力。AGV 自身的最大速度、转弯半径、负载能力等性能参数，也是路径优化模型必须考虑的约束条件，只有将这些参数纳入考量，才能保障规划出的路径既可行又高效。将仓储相关因素融入路径规划算法，有助于提升 AGV 在复杂环境下的适应能力，同时减少任务完成时间，降低能耗。

（三）算法改进与融合实现高效路径规划

为解决智能仓储复杂路径规划问题，研究者提出多种算法改进与融合策略。将传统与智能优化算法结合是常用方法，如 A 算法与人工势场法融合，以人工势场法快速收敛特性生成初始路径，再经 A 算法全局优化，兼顾路径光滑度与计算效率。也有策略将多种算法优势互补，像遗传算法与蚁群算法结合，凭借遗传算法全局搜索、蚁群算法正反馈机制，优化路径长度与安全性。此外，基于深度学习的路径规划方法备受关注，改进的 DQN 算法引入经验知识模型，助力 AGV 提前规避冲突与障碍物，加速算法收敛、缩短行程时间^[10]。这些策略有效提升路径规划效率，为智能仓储 AGV 实际应用提供灵活可靠方案。

参考文献

- [1] 陈浩泽. 多传感器融合 AGV 在仓储环境导航的应用研究 [D]. 北部湾大学, 2024.
- [2] 徐欣川, 陈琦璋, 余峰, 肖吴远, 柯英, 程健, 吴建军. 基于多传感器信息融合的 AGV 自主无轨导航技术 [J]. 湖北理工学院学报, 2024, 40(3): 13-17.
- [3] 李浩, 杜开成, 邢志远, 王广伟, 张皓博, 刘根. 基于多传感器融合的物流 AGV 精准定位及在人机安全中的应用 [J]. 制造技术与机床, 2024, (5): 63-69.
- [4] 王云峰, 曹小华, 郭兴. 基于改进 A*(*) 算法和系统短期状态预测的仓储 AGV 路径规划方法 [J]. 计算机集成制造系统, 2023, 29(11): 3897-3908.
- [5] 杨惠, 周小燕. 基于多传感器数据融合的 AGV 定位方法研究 [J]. 电子测试, 2021, 32(10): 42-43.
- [6] 司明, 郭伯藩, 胡灿, 邢伟强. 智能仓储交通信号与多 AGV 路径规划协同控制方法 [J]. 计算机工程与应用, 2024, 60(11): 290-297.
- [7] 钱晓明, 黄宇轩, 楼佩煌, 孙天. 基于多传感器融合的跟随 AGV 复合导引技术 [J]. 农业机械学报, 2022, 53(1): 14-22.
- [8] 张艳菊, 吴俊, 程锦倩, 陈泽荣. 多搬运任务下考虑碰撞避免的 AGV 路径规划 [J]. 计算机应用研究, 2024, 41(5): 1462-1469.
- [9] 朱明明, 伍玉霞. 基于多传感器融合的 AGV 导航技术 [J]. 机械设计与制造工程, 2024, 53(5): 61-66.
- [10] 谢勇, 郑绥君, 程念胜, 朱洪君. 基于改进 DQN 算法的无人仓多 AGV 路径规划 [J]. 工业工程, 2024, 27(1): 36-44.

四、实际应用中的技术难题与解决办法

（一）传感器数据同步问题

在多传感器融合的 AGV 导航控制系统中，传感器数据同步是确保系统定位精度和环境感知可靠性的核心技术。实际工程应用中，由于不同传感器（如激光雷达与摄像头）的采集频率存在显著差异，加之网络带宽限制和硬件接口性能等因素导致的数据传输延迟，往往会造成多源数据的时间戳不一致问题，从而严重影响后续融合算法的性能表现。针对这一技术难题，在硬件层面，可以采用基于外部时钟信号的同步触发机制，实现对多传感器采集时刻的统一控制；在软件层面，设计高精度的时间戳插值补偿算法，有效解决异步数据的时序对齐问题。

（二）算法实时性问题

动态仓储中 AGV 路径优化与导航控制对实时性要求高，需快速响应环境变化。但计算复杂度与传感器数据量制约算法实时性，如深度学习目标识别因计算密集耗时，数据处理融合也加剧挑战。可从三方面解决：优化算法效率，简化模型或用轻量化算法降计算负担；借助 GPU 等硬件加速技术提升数据处理速度；设计分层架构，分离高实时性关键任务与低优先级任务，保障关键任务及时执行，兼顾算法性能与实时性需求。

（三）系统稳定性问题

在实际仓储中，AGV 导航控制系统常面临稳定性挑战，影响作业安全与效率。电磁干扰会致传感器信号失真、数据传输错误，干扰导航精度；地面不平与振动会干扰运动控制，引发定位偏差。为保障系统稳定，硬件上可采用电磁屏蔽，使用屏蔽电缆、滤波电路，优化传感器安装与固定；软件层面引入容错机制，通过冗余设计和异常检测算法处理故障。通过软硬件协同，能提升 AGV 导航控制系统的鲁棒性与可靠性，为智能仓储高效运作提供支撑。

五、结束语

多传感器融合技术整合激光雷达等数据，弥补单一传感器局限，结合相关算法从多维度提升 AGV 性能，实现复杂环境感知与高精度定位。基于该技术的导航控制系统借 SLAM 算法实现精准定位与地图构建，结合分层架构和软硬件协同保障实时性与可靠性。路径优化上，单一算法有局限，算法改进与融合可提升效率与最优性，需考虑仓储相关因素。针对实际问题，相应解决方案能提升系统鲁棒性。综上，多传感器融合与路径优化结合是未来发展关键，为智能仓储升级提供支撑。