

移动机器人路径规划中ROS2中间件性能的研究综述

赵 鹏, 朱克佳

广州软件学院电子信息与控制工程学院, 广东 广州

收稿日期: 2025年7月2日; 录用日期: 2025年7月31日; 发布日期: 2025年8月7日

摘 要

随着移动机器人在工业自动化、特种作业及智能服务领域的广泛应用, 其路径规划能力越来越依赖机器人操作系统ROS2的通信性能。ROS2通过去中心化架构与数据分发服务中间件显著提升了系统可靠性, 但动态复杂环境中路径规划对通信延迟、带宽及稳定性的严苛要求, 使中间件性能成为影响实时规划精度的关键瓶颈。近年来针对DDS、Zenoh等中间件的优化研究大量涌现, 但仍缺乏对多协议多场景性能指标的跨维度系统性总结。本文综述了近年来核心研究成果, 深入剖析了ROS2中间件从通用架构向场景定制化设计的转型趋势; 论证了路径规划与通信服务质量的深度耦合机制; 总结了嵌入式协同与边缘智能的系统级优化机制。文末提出了目前研究还存在的一些问题。

关键词

中间件, ROS2, DDS, Zenoh, 路径规划

A Review of the Performance of ROS2 Middleware in Mobile Robot Path Planning

Peng Zhao, Kejia Zhu

School of Electronic Information and Control Engineering, Software Engineering Institute of Guangzhou (SEIG), Guangzhou Guangdong

Received: Jul. 2nd, 2025; accepted: Jul. 31st, 2025; published: Aug. 7th, 2025

Abstract

With the wide application of mobile robots in industrial automation, special operations and intelligent services, their path planning capabilities are increasingly dependent on the communication performance of the Robot Operating System (ROS2). ROS2 has significantly enhanced system reliability through a decentralized architecture and Data Distribution Service (DDS) middleware. However, the

strict requirements for communication delay, bandwidth and stability in dynamic and complex environments for path planning have made middleware performance a key bottleneck affecting real-time planning accuracy. In recent years, a large number of optimization studies on middleware such as DDS and Zenoh have emerged, but there is still a lack of cross-dimensional systematic summaries of performance indicators for multiple protocols and scenarios. This paper reviews the core research achievements in recent years, deeply analyzes the transformation trend of ROS2 middleware from a general architecture to scenario-customized design; demonstrates the deep coupling mechanism between path planning and communication quality of service; and summarizes the system-level optimization mechanisms of embedded collaboration and edge intelligence. At the end of the paper, some existing problems in current research are proposed.

Keywords

Middleware, ROS2, DDS, Zenoh, Path Planning

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着机器人技术在工业自动化、特种作业及智能服务领域的广泛应用, 移动机器人的路径规划能力已成为其自主导航的核心支撑。机器人操作系统 2 (Robot Operating System 2, ROS2) 作为新一代分布式通信框架, 通过数据分发服务 (Data Distribution Service, DDS) 中间件 (ROS2 系统中的 DDS 体系结构如图 1 所示) 实现了去中心化通信, 显著提升了系统的可靠性和扩展性 [1]。然而, 在动态复杂环境中路径规划算法对通信延迟、带宽和可靠性的敏感性, 使 ROS2 中间件性能成为制约规划效能的关键因素——例如, Chovet 等人 [2] 发现行星探测多机网络网络中, 拓扑动态变化可导致传统 DDS 协议延迟激增。

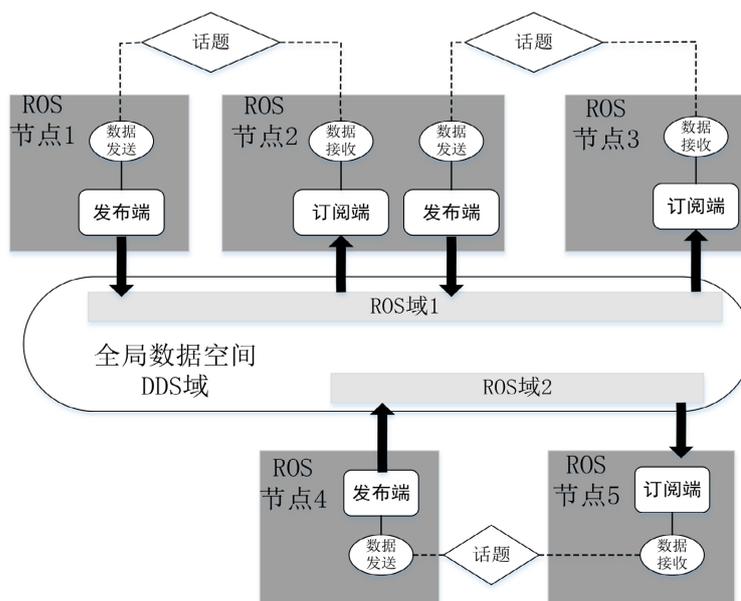


Figure 1. DDS architecture in ROS2 system

图 1. ROS2 系统中的 DDS 体系结构

这一挑战催生了轻量化协议的革命性突破, Zenoh [3]协议(Zero Overhead Network Protocol, Zenoh), 其实际运行示意图如图 2 所示, Zenoh 基本发布 - 订阅模式, 旨在统一数据在传输、存储与分布式计算场景下的数据抽象, 凭借 5 字节协议头与发布 - 订阅、地理分布式存储和查询融合机制, 在资源受限场景下将端到端延迟显著降低, 数据开销明显压缩[4] [5], 其性能优势在边缘计算架构中尤为凸显。

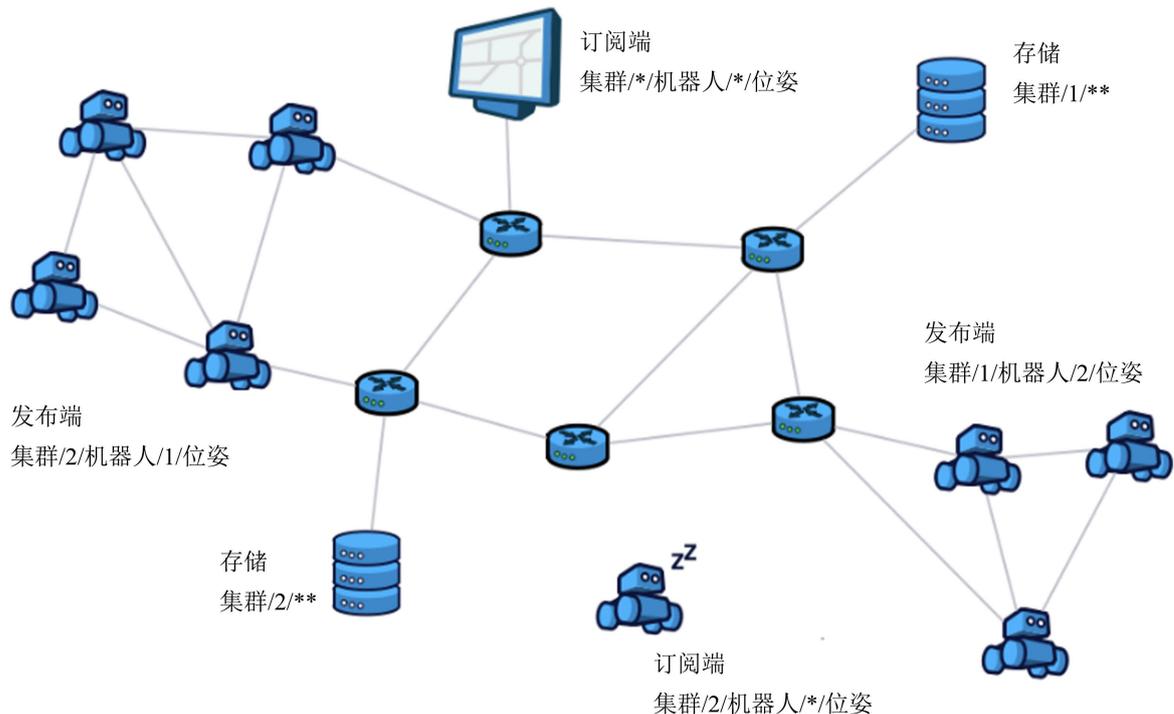


Figure 2. The actual operation diagram of the basic publish-subscribe mode of Zenoh

图 2. Zenoh 基本发布 - 订阅模式的实际运行示意图

同时国内研究团队在嵌入式实时适配领域取得显著进展, 高华[6]实现了极端资源受限环境 Micro XRCE-DDS (eXtreme Resource-Constrained Environment, XRCE)在实时操作系统 NuttX 上的部署; 而董利邦[7]通过双重创新, 定制服务质量 QoS (Quality of Service, QoS)通道与基于以数据为中心的发布 - 订阅模型 DCPS (Data-Centric Publish-Subscribe, DCPS)优化, 提高了节点间的数据交换效率, 实现了多协议数据传输, 增强了数据交互的灵活性。这些突破与算法 - 中间件的深度协同形成呼应, 李冰鑫[8]提出的全局信息已知情况下的混沌优化自适应萤火虫路径规划算法能够有效缩短全局路径长度, 减少收敛时间, 对机器人路径规划的质量和效率具有显著的影响; 徐永成[9]提出了深度确定性策略梯度算法(Deep Deterministic Policy Gradient, DDPG)的改进版 I-DDPG (Improved-DDPG)加快了训练流程, 减少了训练过程中的不稳定因素, 所得出的规划路径更短。虽然进展显著, 但当前研究仍存不足与改进空间, 如动态环境实时性验证仍需深化、资源受限场景适配有待强化等等。

2. ROS2 中间件架构的演进与性能特征

近年来研究表明, ROS2 中间件架构已从通用型 DDS 实现转向场景定制化设计, ROS2 系统中间件使用示意图如图 3 所示。Macenski 等[1]在《Science Robotics》的系统性分析揭示, ROS2 通过去中心化架构解决了 ROS1 的单点故障问题, 其模块化设计支持动态加载通信组件, 为多机器人系统提供基础支撑。

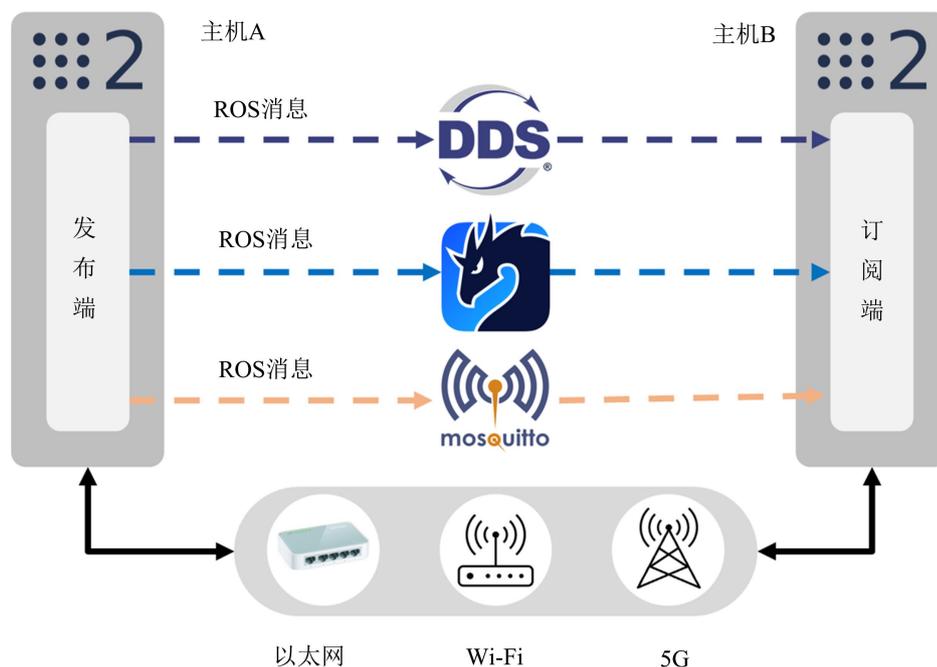


Figure 3. Schematic diagram of ROS2 system middleware usage [5]

图 3. ROS2 系统中间件使用示意图[5]

核心突破在于中间件实现的多样性: Chovet 团队通过行星探测多机器人网络测试发现, 在动态拓扑环境下, Zenoh 中间件通过其独特的发现机制, 显著降低了发现过程的数据开销, 相较于 Fast DDS [10]和 Cyclone DDS [11], 其开销降低了 97%至 99.9%。这种性能差异源于底层协议革新, Zhang 等[5]在实际机器人跨网络测试中表明, Zenoh 协议在 Wi-Fi 与 4G 不稳定网络中轨迹漂移误差最小, 而 Cyclone DDS 在稳定以太网环境中保持吞吐量优势。值得注意的是, Corsaro 等[4]使用“统一数据在存、数据在途与计算”模型, 通过“发布 - 订阅 - 查询”机制实现云边端协同, 为分布式路径规划开辟了新范式。但现有研究仍存在局限: 多数测试集中在理想化仿真或实验环境下, 缺乏真实工业场景下的长时间稳定性验证, 且对异构硬件平台的适配性研究不足。

3. 路径规划算法与中间件的深度耦合机制

移动机器人路径规划的性能提升日益依赖于智能算法与底层通信中间件的协同优化。研究发现, 如 RRT* (Rapidly-exploring Random Tree Star, RRT*)、遗传算法等全局规划算法与如深度强化学习、人工势场法等局部避障算法对通信性能的需求存在明显差异。这种差异构成了耦合机制研究的核心驱动力。例如, 西安理工大学团队[12]在综合未知环境下的深度强化学习路径规划研究中揭示, 全局路径搜索对通信延迟的容忍度相对较高, 而局部避障模块若因通信延迟丢失如动态障碍物位置等关键环境信息, 轨迹跟踪误差将显著增大, 这种对实时性的敏感需求直接催生了创新架构的探索。

在全局规划领域, 优化策略侧重于数据完整性与异步通信。上海交通大学团队[13]针对狭窄复杂空间下机器人导航, 提出了一种端到端强化学习框架。该框架的全局路径生成模块创新性地采用 Cyclone DDS 的持久化存储服务, 以极低频传输静态地图数据。其核心价值在于允许通信短暂中断时通过历史数据恢复完整环境信息, 有效避免了传统 SLAM (Simultaneous Localization and Mapping, SLAM)算法因数据丢包导致的定位漂移问题。实测验证该策略在极具挑战性的 U 型狭窄死区环境中显著提升了机器人的脱困成功率。武小年等[14]的研究则通过遗传 - 蚁群混合算法 GACO (Genetic Algorithm and Ant Colony Optimization,

GACO)进一步实践了分层通信理念, 将任务分解为任务层和运动层, 在复杂障碍环境中明显提高了规划效率。然而, 这些研究普遍未建立如频率、延迟阈值等通信参数与如长度、平滑度、最优性等最终路径质量之间的精确量化模型。

相比之下, 局部避障算法对通信延迟的容忍度极低, 对高频率、低延迟的数据传输要求苛刻。西安理工大学应用改进双深度 Q 网络(Improved Double Deep Q-Network, IDDPQN)算法在未知环境路径规划中, 明确指出了动作决策环的通信延迟对系统性能的关键影响: 当延迟超过传感器采样周期时, 累积误差会导致明显的轨迹振荡甚至避障失败。该团队通过采用 Zenoh 中间件的零拷贝传输机制, 显著降低了高分辨率激光点云数据的传输延迟, 从而大幅提升了动态障碍物避碰的成功率。这一发现突显了中间件传输机制对实时决策算法的瓶颈作用及其优化潜力。类似地, 上海交通大学在解决狭窄环境导航中的计算瓶颈时, 发现即使集成了 FPGA 硬件加速模块, 传统 DDS 的序列化开销仍成为限制 RRT*算法性能的主要因素。通过切换到 Zenoh 的零拷贝方案, 点云数据的传输延迟得到数量级降低, 最终显著提升了狭窄通道的规划效率。

纵观近年研究, 我们可以定义一个移动机器人路径规划任务-QoS 需求的映射模型, 如图 4 路径规划任务-QoS 需求映射模型层级映射逻辑示意图所示, 该模型通过解构路径规划任务的算法类型、环境动态性、机器人运动学约束等多维特征, 建立与通信数据流 QoS 策略的定量映射关系。其核心在于根据任务感知的全局规划算法或局部避障算法动态适配机制、环境动态性、机器人运动学约束等因素, 最终输出分层 QoS 策略组合, 实现通信资源与算法需求的最优匹配。

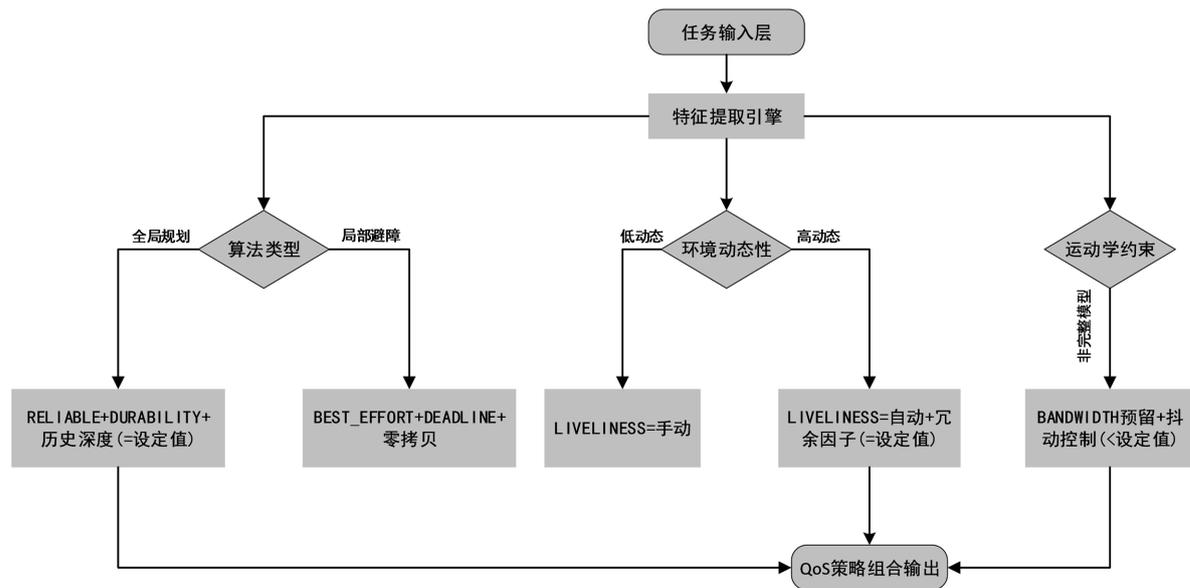


Figure 4. With the path planning task-QoS requirement mapping model hierarchical mapping logic diagram
图 4. 路径规划任务-QoS 需求映射模型层级映射逻辑示意图

与此同时, 异构计算与跨域验证进一步拓展了耦合机制的边界。FPGA (Field-Programmable Gate Array, FPGA)硬件加速与 Zenoh 轻量化通信协议的结合成为突破通用中间件性能瓶颈的有效途径。军事领域中的通信干扰任务分配中应用的遗传蚁群混合算法, 为分层通信策略提供了跨领域佐证[15], 该研究表明, 在存在随机干扰的环境中, 通信延迟若超过决策窗口的特定比例, 会导致任务分配最优解搜索失败率急剧增加。其采用的双层随机机会约束模型有效提升了系统在不确定性下的鲁棒性, 其方法论与机器人路径规划中的分层通信需求高度契合。

尽管路径规划算法与中间件的深度耦合机制虽通过分层 QoS 策略与异构计算优化取得了显著突破, 但通信 - 算法量化模型缺失与动态环境适配局限仍制约着系统可靠性。随着应用场景向高干扰工业环境拓展, 需在嵌入式实时架构与边缘跨模态协同层面实现技术跃迁。

4. 嵌入式协同与边缘智能的系统级优化机制

随着移动机器人应用场景向工业、仓储等高动态环境扩展, 嵌入式实时性保障与边缘智能协同共同构成系统级优化的核心挑战。这些挑战的解决依赖于硬件架构创新与通信中间件的深度协同, 其技术演进路径与算法 - 中间件耦合机制形成“感知 - 决策 - 控制”闭环的技术生态。

4.1. 嵌入式系统的实时性突破

嵌入式平台资源受限特性与实时控制需求的矛盾催生了轻量化中间件适配研究。李纯艳等提出的改进麻雀搜索算法, 通过精英反向学习与高斯 - 柯西变异策略优化轨迹平滑性, 显著降低了工业机器人的能耗[16]; 颜双权等开发的 B 样条径向基神经网络补偿方法, 则在嵌入式系统中实现了亚毫米级轨迹跟踪精度[17]。这两项技术共同验证了智能算法与实时控制链路的协同潜力, 但其验证场景局限于实验室环境。麻雀搜索算法仅在结构化焊接工作站测试能耗, 未涉及动态避障场景的轨迹鲁棒性验证; B 样条补偿方法虽在工业机械臂取得高精度, 却未考察振动、温变等工业因子对嵌入式中间件实时性的影响。这种场景与需求的割裂暴露了当前研究的共性瓶颈, 缺乏面向高干扰工业环境的可靠性注入测试。

在应对多机器人协同的实时性挑战方面, 分布式模型预测控制 DMPC (Distributed Model Predictive Control, DMPC) 架构展现出显著优势。湖北工业大学朱涵宗的研究通过多重创新优化编队性能: 设计最小最大 DMPC 算法解决系统模型不确定性导致的稳态误差, 利用线性矩阵不等式转化优化问题; 开发数据驱动 DMPC 算法降低保守性, 融合历史数据与实时预测减少计算耗时; 最终在 ROS 平台上实现了异构硬件协同, 通过跨平台 DDS 中间件保障控制指令的精确同步。该方案显著提升了多机器人编队的轨迹跟踪精度与任务效率, 但未量化高密度动态障碍场景下的通信延迟阈值, 难以评估工业复杂环境的鲁棒性边界[18]。

硬件层面的异构计算协同同样取得关键突破。浙江大学章昌仲团队开发的面向智能移动机器人的混合操作系统平台 SROS (Smart Robot OS, SROS) 创新性地整合嵌入式高性能 SoC (System on Chip, SoC) 与单片机: 在实时核运行运动控制任务, 应用核处理 SLAM 与通信中间件, 通过定制化 DDS 协议实现跨核高效传输。实验证明, 相较于传统单片机构架, 该平台在路径规划任务中显著降低端到端延迟并大幅缩短系统启动时间。然而, 其通信中间件在无线干扰环境下出现数据包重传率上升现象, 凸显工业电磁兼容性验证的缺失[19]。

4.2. 边缘计算驱动的跨模态协同

边缘计算架构通过分布式算力调度缓解移动平台资源约束, 但多模态数据流的实时协同成为核心挑战。郭兴等学者在异构无人系统协同控制研究中揭示: 视觉、激光与位姿数据的传输时延差异显著放大动态环境感知偏差。其提出的分层协同框架将计算密集型任务卸载至边缘节点低频更新, 而时敏任务进行本地高频闭环处理, 显著提升了动态目标追踪精度。然而该框架未集成动态带宽分配机制, 在无线信道波动场景下面临稳定性风险[20]。

工业实践进一步验证跨模态协同的复杂性。王昕媛在精准农业研究中构建空地协同架构: 无人机搭载边缘计算单元处理农田全局路径规划, 农用无人车本地执行播种避障控制, 通过分级通信实现跨模态数据融合。该方案在麦田测试中提升了作业覆盖率, 但因缺乏多模态优先级仲裁, 在障碍密集区出现激光点云与视觉数据的传输冲突, 导致局部路径规划延迟显著增加[21]。类似地, 章昌仲团队将混合操作系

统 SROS 扩展至仓储边缘场景, 通过 DDS 中间件优先级设置分流高优先级的激光与中优先级的视觉数据, 虽降低了端到端延迟, 却在多机器人密集交互时出现了关键避障指令丢包率上升现象。上述案例揭示了边缘智能的核心瓶颈和跨模态 QoS 仲裁模型缺失。

综上所述, 当前嵌入式协同与边缘智能优化虽在算法 - 硬件协同层面取得突破, 却因工业场景验证缺失与跨模态仲裁机制空白而面临可靠性瓶颈。嵌入式协同优化技术路线对比如表 1 所示, 这些系统性短板亟待通过动态 QoS 引擎、实时微内核架构及语义通信范式的创新实现范式跃迁, 从而支撑高动态环境下“感知 - 决策 - 控制”链路的极致鲁棒性。

Table 1. Comparison of embedded collaborative optimization technology routes

表 1. 嵌入式协同优化技术路线对比

技术路线	核心创新	工业适配瓶颈
智能算法优化	麻雀搜索算法提升轨迹平滑性, B 样条补偿实现亚毫米级跟踪精度	未验证动态避障鲁棒性
多机协同控制	最小最大 DMPC 解决模型不确定性, 数据驱动 DMPC 降低计算保守性	大规模组网可靠性未验证
异构计算架构	整合实时核与应用核, 定制 DDS 协议实现跨核高效传输	工业电磁兼容性未测试
共性瓶颈	算法 - 硬件 - 通信的深度协同潜力显著	实验室与工业场景割裂

5. 创新方向与技术展望

综合分析, 未来突破将聚焦三个维度: 在动态适应性方面, 环境感知的 QoS 引擎成为关键, 需开发带宽 - 延迟 - 可靠性的自适应调节算法, 结合李宏[22]提出的延迟预测模型, 实现复杂场景的鲁棒控制。嵌入式方向, 高华与王文重[23]的研究指向 ROS2-RTOS 微内核架构, 需解决实时任务调度与内存保护的矛盾, 尤其针对 Cortex-M 系列微控制器的资源约束优化。安全领域则需融合 TEE 可信执行环境与数据分发机制, 建立轻量化认证协议。值得关注的是, 命名数据网络 NDN (Named Data Networking, NDN)与 ROS2 的语义融合可能重构通信范式, 通过命名数据路由替代传统地址寻址, 预计可以大大减少协议转换开销[24]。这些创新将推动移动机器人在智能制造、特种环境作业等场景实现从“功能实现”到“极致可靠”的跨越。

6. 总结

当前研究呈现三大趋势: 其一, ROS2 中间件性能优化从通用 DDS 转向场景定制化, Zenoh 等轻量化协议在动态网络和资源受限场景展现显著优势; 其二, 路径规划算法与中间件的协同设计成为主流, 通过 QoS 策略绑定关键数据流, 保障实时性; 其三, 边缘计算架构依赖中间件实现计算卸载, 需进一步优化端边云协同机制。然而, 现存不足亦不容忽视: 动态障碍物密集场景下通信可靠性仍不足; 多模态传感器数据融合缺乏统一传输标准; 嵌入式实时系统支持尚不完善。未来研究需突破三方面: 开发环境自适应的 QoS 动态调节机制, 构建跨平台如 ROS2-RTOS 微内核的实时通信框架, 以及探索 NDN 与 ROS2 的融合, 从而全面提升复杂场景下的路径规划鲁棒性。

基金项目

广州软件学院科研项目(KY202411): 基于 ROS 系统室内移动机器人的路径规划技术研究。

参考文献

- [1] Macenski, S., Foote, T., Gerkey, B., Lalancette, C. and Woodall, W. (2022) Robot Operating System 2: Design, Architecture, and Uses in the Wild. *Science Robotics*, 7, eabm6074. <https://doi.org/10.1126/scirobotics.abm6074>
- [2] Chovet, L.P., Garcia, G.M., Bera, A., Richard, A., Yoshida, K. and Olivares-Mendez, M.A. (2025) Performance Comparison of ROS2 Middlewares for Multi-Robot Mesh Networks in Planetary Exploration. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 111, Article No. 18. <https://doi.org/10.1007/s10846-024-02211-2>
- [3] Eclipse Zenoh (2022) Pub/Sub in Zenoh. <https://zenoh.io/docs/overview/zenoh-in-action/>
- [4] Corsaro, A., Cominardi, L., Hecart, O., Baldoni, G., Avital, J.E.P., Loudet, J., et al. (2023) Zenoh: Unifying Communication, Storage and Computation from the Cloud to the Microcontroller. 2023 26th Euromicro Conference on Digital System Design (DSD), Golem, 6-8 September 2023, 422-428. <https://doi.org/10.1109/dsd60849.2023.00065>
- [5] Zhang, J., Yu, X., Ha, S., Peña Queralta, J. and Westerlund, T. (2024) Comparison of Middlewares in Edge-to-Edge and Edge-to-Cloud Communication for Distributed ROS 2 Systems. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 110, Article No. 162. <https://doi.org/10.1007/s10846-024-02187-z>
- [6] 高华. ROS2 的 RTOS 支持扩展研究与实现[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京邮电大学, 2020.
- [7] 董利邦. 面向 ROS2 的 RT-Smart 通信中间件研究与实现[D]: [硕士学位论文]. 海口: 海南大学, 2023.
- [8] 李冰鑫. 智慧机器人路径规划算法研究与应用[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 青岛科技大学, 2024.
- [9] 徐永成. 基于深度强化学习的移动机器人路径规划方法研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2024.
- [10] Maruyama, Y., Kato, S. and Azumi, T. (2016) Exploring the Performance of ROS2. *Proceedings of the 13th International Conference on Embedded Software*, New York, 1-7 October 2016, 1-10. <https://doi.org/10.1145/2968478.2968502>
- [11] eProxima (2022) Fast DDS vs Cyclone DDS. <https://www.eprosima.com/developer-resources/performance/fast-dds-vs-cyclone-dds-performance>
- [12] Bai, Z., Pang, H., He, Z., Zhao, B. and Wang, T. (2024) Path Planning of Autonomous Mobile Robot in Comprehensive Unknown Environment Using Deep Reinforcement Learning. *IEEE Internet of Things Journal*, 11, 22153-22166. <https://doi.org/10.1109/jiot.2024.3379361>
- [13] Zheng, H., et al. (2025) Embodied Escaping: End-to-End Reinforcement Learning for Robot Navigation in Narrow Environment. *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. arXiv: 2503.03208.
- [14] 武小年, 奚玉昂, 张润莲. DEM 中基于遗传与蚁群的混合路径规划算法[J]. 计算机应用研究, 2020, 37(9): 2694-2697.
- [15] 胡波, 侯琳. 双层随机机会约束规划的通信干扰任务分配优化仿真[J]. 计算机工程与应用 2014, 39(11): 59-63.
- [16] 李纯艳, 晁永生, 陈帅, 等. 基于改进麻雀搜索算法的机器人能耗最优轨迹规划[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2022(6): 180-182+187.
- [17] 颜双权, 胥建成. 工业机器人复杂 B 样条曲线轨迹控制精度补偿[J]. 机械制造与自动化, 2023, 52(5): 32-35.
- [18] 朱涵宗. 基于分布式模型预测控制算法的多移动机器人编队[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 湖北工业大学, 2023.
- [19] 章昌仲. 面向智能移动机器人的混合操作系统平台设计与实现[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- [20] 郭兴, 李擎, 姚其家, 等. 异构无人系统协同控制研究进展[J]. 工程科学学报, 2025, 47(1): 66-78.
- [21] 王昕媛. 面向精准农业的异构无人系统协同方法研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2022.
- [22] 李宏. 轮式移动机器人的路径规划与跟踪控制研究[D]: [硕士学位论文]. 秦皇岛: 燕山大学, 2023.
- [23] 王文重. 基于 ROS2 的分布式智能边缘云平台: WenKe [D]: [硕士学位论文]. 上海: 华东师范大学, 2024.
- [24] López Escobar, J.J., Díaz-Redondo, R.P. and Gil-Castiñeira, F. (2024) Unleashing the Power of Decentralized Serverless IoT Dataflow Architecture for the Cloud-to-Edge Continuum: A Performance Comparison. *Annals of Telecommunications*, 79, 135-148. <https://doi.org/10.1007/s12243-023-01009-x>