

跟随型移动机器人关键技术与挑战综述

张思龙^{1, 2}, 姚瀚晨^{2*}, 苏泽凡², 李毅焘², 林思超²

(1. 福州大学电气工程与自动化学院, 福建 福州 350108; 2. 中国科学院福建物质结构研究所, 福建 福州 350005)

摘要: 跟随机器人作为服务机器人领域的重要分支, 近年来在工厂巡检、物流运输等场景中展现出广泛应用前景。本文系统综述了跟随机器人关键技术的研究进展, 涵盖感知、控制、SLAM 及路径规划等四大核心模块。在感知方面, 总结了激光雷达、单/双目视觉和 UWB 等传感器的融合方法, 分析其适用性与局限性; 控制方面, 梳理了阻抗控制、导纳控制、最优控制与深度强化学习等策略, 探讨其在鲁棒性与人机交互性之间的平衡; 定位建图方面, 对激光/视觉 SLAM 与无线定位方法的集成进行了比较; 路径规划方面, 分析了多种优化算法与启发式搜索策略在动态环境下的应用效果。此外, 本文归纳了跟随精度易受环境干扰、目标快速运动引发响应滞后、长时跟随导致误差累积及人机交互自然度不足等挑战, 并总结了当前研究中应对这些问题的代表性策略。最后, 总结提炼出未来研究方向应聚焦于多模态感知鲁棒性提升、人机交互智能化、自主能耗管理及多机器人协同机制的构建。

关键词: 跟随机器人; 人机交互; 多传感器融合; 人机共融

中图分类号: TP242.6 **文献标志码:** A

A Review of Key Technologies and Challenges of Following Mobile Robots

ZHANG Silong^{1, 2}, YAO Hanchen^{2*}, SU Zefan², LI Yitao², LIN Sichao²

(1. College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

2. Fujian Institute of Research on the Structure of Matter, Chinese Academy of Sciences, Fuzhou 350005, China)

Abstract: As an important branch of service robotics, following robots have demonstrated broad application prospects in scenarios such as factory inspection and logistics transportation in recent years. This paper presents a comprehensive review of key technologies in following robots, covering four core modules: perception, control, SLAM, and path planning. In the perception module, it summarizes sensor fusion methods involving LiDAR, mono/stereo vision, and UWB, and analyzes their applicability and limitations. In terms of control, it reviews strategies such as impedance control, admittance control, optimal control, and deep reinforcement learning, focusing on the trade-offs between robustness and human-robot interaction. For localization and mapping, the paper compares the integration of LiDAR/visual SLAM with wireless positioning techniques. In the path planning module, various optimization algorithms and heuristic search strategies are analyzed for their effectiveness in dynamic environments. Moreover, this review identifies and categorizes major technical challenges, including perception degradation under environmental disturbances, response delay due to rapid target motion, accumulated errors in long-term following, and insufficient naturalness in human-robot interaction. Representative solutions addressing these issues are also summarized. Finally, the paper outlines future research directions, emphasizing improvements in multimodal perception robustness, intelligent interaction, autonomous energy management, and collaborative mechanisms in multi-robot systems.

Keywords: human-following robot; human-robot interaction; multi-sensor fusion; human-robot integration

1 引言

近年来,机器人自主跟随技术在具身智能和人机共融等领域取得显著进展。跟随机器人能够自主感知并跟踪移动目标,其核心任务是能够精准地跟随目标对象或按预定路线移动^[1]。该技术在物流搬运、户外巡检等多种应用场景中显示出巨大潜力,如图1所示。为了提升目标定位与感知精度,多种感知方案被提出,包括超宽带(Ultra-Wideband, UWB)、激光即时定位与地图构建

(Simultaneous Localization and Mapping, SLAM)、机器视觉和红外阵列等传感器技术;同时,深度学习等先进算法显著增强了移动机器人的路径规划和多任务决策能力。此外,多样化的系统设计方法和架构也为特定应用场景提供了定制化的解决方案。然而,当前跟随机器人仍面临系统鲁棒性不足、复杂环境导航精度降低、与人类或多机器人协同困难等挑战。本文综述国内外相关研究成果,重点对比分析关键技术进展,探讨核心问题与未来方向。



a) 物流搬运机器人



b) 户外巡检机器人

图1 跟随机器人实际应用场景

目前,在跟随机器人系统的设计方面国内外已开展大量工作,研究重点包括目标跟踪传感、移动平台结构、通信与控制策略等。在系统架构层面:基于双边双向测距(Symmetrical Double-Sided Two-Way Ranging, SDS-TWR)的UWB室内定位系统被用于实现自主机器人的随动跟随^[2]。2021年,两项研究分别通过摄像头驱动麦克纳姆轮实现全向人员跟随^[3]及利用图像识别实现多机协同跟随^[4]。2022年,改进工作包括基于环形红外阵列的360°近场定位系统、低功耗ROS(Robot Operating System)平台的多任务跟随机器人,以及基于AprilTag标签识别的跟随ROS机器人等^[5-7]。此外,武决光^[8]等融合激光雷达测距、麦克纳姆轮逆运动学和UWB通信,研发出一种具有高精度的全向跟随和障碍物自动避让的全向移动跟随避障系统。这些研究均致力于提高跟随精度、响应效率和适用性:普遍采用无线通信和自动控制

技术,主要使用UWB、摄像头或激光雷达等传感器进行目标追踪与定位,但在具体算法、硬件结构及应用场景上各具特点。

在人机交互性能方面,跟随机器人普遍采用深度学习和传感融合等手段提升人机跟随效果。例如,Li^[9]等调查了老年人对跟随机器人的需求,发现跟随机器人对独立老年人的社会支持具有潜力,但仍需进一步改进以满足使用需求;Jiang^[10]等针对复杂室内环境提出了先预测2D轨迹再估计完整3D轨迹的方法,提高了长距离跟踪的鲁棒性;Su^[11]等提出基于线性二次调节器(Linear Quadratic Regulator, LQR)的伴随控制策略,实验证明相比传统算法该方法显著减少了跟随距离和方向误差。综上所述,当前研究主要通过深度视觉跟踪、鲁棒控制、多传感器融合和强化学习等方法提升机器人与人类的交互质量和跟随稳定性。现有研究为跟随机器人的系统设

计和人机交互提供了丰富思路，但在实际应用中仍需更强的鲁棒性和自适应能力以应对复杂场景。

2 跟随机器人关键技术

为了实现精准稳定的跟随行为，跟随机器人通常由多个子系统协同构成，包括感知系统、控制系统、定位建图系统及路径规划系统等核心模块。各模块通过数据流和控制

制命令进行联动，共同支撑机器人在复杂环境下实现实时感知、自主决策与高效执行。典型跟随机器人系统的整体架构如图 2 所示，其中感知系统负责目标与环境信息的获取，定位与建图模块提供空间位置信息支持，路径规划模块生成合理的运动路径，控制系统则根据感知与规划结果驱动机器人运动，并与人类进行交互协同。

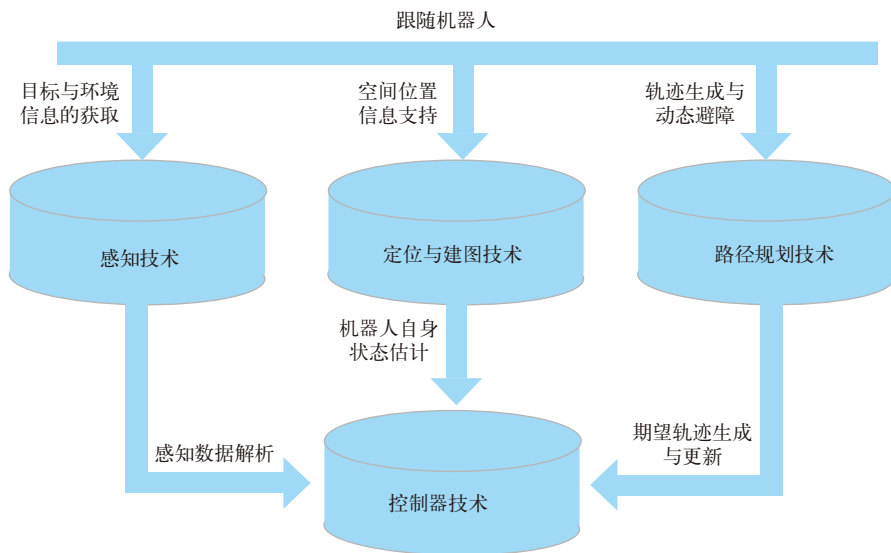


图 2 跟随机器人的关键技术框图

2.1 感知技术

跟随机器人需要实时感知环境中障碍物和目标信息，因此多传感器融合技术得到广泛应用。常用传感器包括激光雷达（2D 或 3D）、摄像头（单目、双目或 RGB-D）、超声波和红外阵列等，这些传感器通过获取目标的距离、图像和深度等信息来实现跟踪定位。目标检测与跟踪算法由传统机器视觉向深度学习演进：包括基于颜色直方图、形状或纹理特征的跟踪算法，以及基于卷积神经网络的目标检测方法。例如，Priyandoko^[12]等在机器人上同时集成了 Microsoft Kinect 和 Hokuyo 激光雷达，并提出了面部检测、腿部检测、颜色检测和聚类检测等多模式跟踪策略，实现了 ROS 框架下的综合跟踪能力。Zhu^[13]等使用云台单目摄像头、孪生网络与光流算法组合实现了实时视觉跟随，大幅提高了跟踪的灵活性和范围。Tsai^[14]等提出了一种结合立体视觉和颜色直方图比较的跟踪器，能够在不同环境下稳定定位目标。Lai^[15]等提出一种轻量级深度学习融合架构，融合深度相

机图像与雷达点云，通过自适应加权融合与时序信息建模，提升机器人在复杂环境中的导航与定位表现。2024 年，Huang^[16]等将 KCF 与 YOLO 结合用于果园移动机器人跟随，通过三维双目视觉恢复目标位置，实现了在干扰环境下的稳定视觉跟踪。此外，Akabane^[17]等利用 UWB 技术进行目标跟踪，相比视觉方法对光照和遮挡条件更具鲁棒性。上述代表性研究在感知技术方面的比较见表 1，包括其主要特征、优势及局限。

以上研究表明，不同感知技术各有侧重：激光雷达和深度相机等可提供高精度的距离信息，有利于环境建模和避障；视觉传感器则提供丰富的目标外观特征，可进行细粒度检测和识别；而 UWB 等无线定位技术在视觉受限环境中展现出较强的鲁棒性。多模态融合成为提高跟随准确性的关键手段，但也带来了系统复杂性和成本的增加。因此，如何在保障鲁棒性的同时控制复杂度，是感知技术发展的重点问题。

表 1 机器人感知技术研究现状

感知技术	核心特征	技术优势	局限与适用场景
2D 激光雷达 ^[8, 12]	采用单线激光雷达检测人体腿部，使用 SVDD 描述属性边界	简单高效，对行人腿部特征敏感	对其他腿型或群体遮挡敏感，受激光水平面高度影响
3D 激光雷达 ^[8, 18]	基于 3D LiDAR 深度学习腿部检测 (Point-Voxel-RCNN) 实现目标追踪	对遮挡和拥挤环境鲁棒，跟踪范围大	对动态遮挡变化敏感，训练模型需求高
单目视觉跟踪 ^[3, 13]	配备云台单目摄像头，结合孪生网络和光流进行人体检测与跟踪	视野大、获取目标外观信息丰富；实时性好	对光照变化敏感，遮挡情况下跟踪精度下降
双目视觉跟踪 ^[4, 14]	使用立体相机和卡尔曼滤波，结合块匹配与颜色直方图进行三维定位跟踪	可以恢复目标深度信息，提高跟踪鲁棒性	计算开销大，对镜头校准和环境光照要求高
深度相机 + 激光 ^[12, 15]	搭载深度相机和 Hokuyo 激光，融合面部、腿部、颜色和团簇检测	多模态信息融合，环境适应性好；实现多种跟踪策略	系统复杂度高，计算和传感器成本较高
UWB 无线定位 ^[8, 19]	利用 UWB 信号测距进行人 - 机器人相对位置估计	不受光照和视觉遮挡影响，具有全天候跟踪能力	需铺设基站，定位精度有限，室内复杂多径效应影响

2.2 控制器技术

跟随机器人需要有效的控制策略来实现目标跟踪和人机交互行为，常用的控制方法包括阻抗控制^[20]、弹簧模型^[21]、导纳控制^[22]、最优控制^[23]和强化学习^[24]等。阻抗控制通过人为设定虚拟弹簧阻尼模型，使机器人在跟随过程中能够呈现仿生的柔顺性；导纳控制则将外部交互力映射为期望位置或速度，强调对人机交互力的动态响应；弹簧模型控制等则通过对目标和障碍物施加虚拟弹簧力场，实现闭环的相对位置控制。在最优控制方面，Herrera^[20]等提出一种基于阻抗控制的领导 - 跟随控制方法，在社交力与运动误差之间建立动态关系并应用

于 Pioneer3AT 机器人，实现了结构化场景中的稳定跟随。LQR 等线性最优控制策略也被用于保证跟随时的距离和方向误差可控^[23]。近年来，研究者还开始采用深度强化学习方法来学习复杂环境中的跟随行为：2022 年赵恩铭^[24]等采用深度强化学习智能体来引导机器人在人群中跟随，通过训练机器人适应人的行为模式来显著改善人机交互效果。此外，模型预测控制 (Model Predictive Control, MPC) 结合阻抗控制的方法也被提出：例如在全向移动机器人上使用外环 MPC 确保姿态精确，内环阻抗控制保持舒适的跟随距离和交互力^[25]。

几种代表性的跟随控制策略及其特点见表 2。

表 2 机器人控制技术研究现状

控制策略	核心特征	技术优势	局限与适用场景
阻抗控制 ^[20]	基于阻抗模型的领导 - 跟随控制，通过社交力建立动态关系	控制平滑，易于实现人与机器人的自然交互	参数需调节，主要适用于结构化社交场景
弹簧模型 ^[21]	将目标腿部与障碍物视作虚拟弹簧，闭环控制相对位姿	算法简单直接，实现避障与跟随的统一	跟随响应可能出现震荡，难以处理高速动态目标
导纳控制 ^[22]	构建交互力模型与导纳控制结合，调整机器人运动柔顺度	提高跟随舒适度与安全性，能结合行为模型模拟避障	对参数设置敏感，变化剧烈的环境响应速度有限
LQR 控制 ^[11, 23]	基于线性二次调节器的人机伴随控制，优化控制距离和方向误差	控制精度高，误差较小	需要准确的人体运动模型，对非线性和大扰动场景适应性差
MPC+ 阻抗 ^[25]	外环 MPC 跟踪目标速度方向，内环阻抗控制人机交互力	同时保证轨迹精度与交互柔顺，适应不同速度的跟随任务	算法复杂度高，对模型不确定性敏感
深度强化学习 ^[24]	基于深度强化学习的引导跟随策略，学习适应拥挤环境中人类行为	在复杂人群环境下可自适应学会跟随，增强了交互	训练成本高；策略可解释性差，对环境变化泛化能力需评估

从表中可以看出，阻抗 / 导纳控制等经典方法能够有效处理人机物理交互，实现舒适的跟随体验，但对环境

和人体动力学假设敏感；优化控制方法提供了跟随精度的保证，但依赖精确模型。深度学习策略能够处理更复

杂的场景并学习人类偏好，但需要大量训练且缺乏可解释性。综合看来，未来的控制策略需要兼顾稳定性、鲁棒性和交互自然度，例如在经典控制框架中引入学习算法，或通过多层级控制融合不同方法的优点。

2.3 定位与建图技术

SLAM 技术是机器人自主导航的基础，对于跟随机器人尤为关键。跟随机器人必须准确估计自身与目标的相对位置并构建环境地图，以实现安全跟随与避障。常见的方法包括：基于激光雷达的 SLAM、基于视觉的 SLAM，以及基于无线信号或标记的定位。其中，激光 SLAM 通过扫描周围环境生成 2D 地图并实时定位，对低纹理环境具有优势^[26]；视觉 SLAM 则利用摄像头提取特征点来恢复机器人位姿及 3D 地图，对动态环境下的定位更灵活^[27]；此外，多传感器融合方法可以提升定位精度和鲁

棒性；Wang^[28]等提出的激光-IMU（Inertial Measurement Unit，惯性测量单元）-GNSS（Global Navigation Satellite System，全球导航卫星系统）紧耦合 SLAM 系统具备对 GNSS 丢失的容错机制，在矿区或信号退化环境中依然能实现连续且鲁棒的定位；Lv^[29]等基于连续时间固定滞后平滑方法，将 LiDAR、IMU 与相机数据紧密融合于 SLAM 因子图，支持异步时间偏校准，并实现高精度、实时性的轨迹估计。总之，多源异构传感器信息融合成为提高跟随定位可靠性的常用策略。然而，各类方法也各有局限：激光 SLAM 在开阔无明显特征的区域性能下降，视觉 SLAM 对光照变化敏感。因此，为特定应用场景选择合适的定位方案，并结合传感器融合与滤波算法，是跟随机器人研究中的重要课题。

代表性定位与建图方法的特点对比总结见表 3。

表 3 机器人定位与建图技术研究现状

定位方法	核心特征	技术优势	局限与适用场景
激光 SLAM ^[26]	基于 LiDAR 构建 2D 地图（如 GMapping）并定位	在低纹理环境下定位稳定，实时性好	对动态障碍物敏感，在缺乏几何特征的环境中性能下降
视觉 SLAM ^[27]	基于 RGB 相机特征点构建稠密地图，提供 6-DOF 定位	对室内具有丰富纹理的环境效果好，设备成本低	对光照变化和快速运动敏感，计算资源需求高
激光+IMU+GNSS SLAM ^[28]	紧耦合融合 LiDAR + IMU + GNSS，具备 GNSS 丢失容错机制	适用于隧道矿区等弱信号场景，定位连续性强	系统复杂，依赖高精度 GNSS，验证环境较窄
激光+IMU+视觉 SLAM ^[29]	基于因子图的连续时间固定滞后平滑框架，融合 LiDAR + IMU + Camera，支持在线时间偏校准	异步数据处理鲁棒，精度高，适应复杂环境	未集成 GNSS，适用范围偏室内，计算量大

表中方法可以组合使用以提升整体性能，例如 LiDAR 与相机的 SLAM 结合可以兼顾结构和纹理信息；激光 SLAM 与 IMU、GNSS 互补，则在室内外环境间切换时提高鲁棒性。总之，有效的定位与建图方案应基于应用场景合理选择并融合多源信息，以确保跟随过程中的精确导航和动态避障。

2.4 路径规划技术

在跟随过程中，机器人需要实时规划运动路径以躲避障碍物并保持与目标的相对位置。传统路径规划算法和优化算法都被应用于跟随机器人的路径生成与优化^[30]。近年来，研究者针对不同场景提出了多种改进策略。魏博^[31]等针对传统蝴蝶优化算法（Butterfly Optimization Algorithm，BOA）在复杂环境下收敛慢的问题进行了改进，结合帐篷映射、自适应香味值和遗传选择因子加速全局搜索。梁凯^[32]等将改进白鲸优化算法（Improved

Beluga Whale Optimization，IBWO）与时间弹性带（Timed Elastic Band，TEB）局部优化相结合，实现了全局最优路径与局部平滑的有机融合。在采样算法方面，一些工作通过引入动态目标偏置和改进人工势场法（Artificial Potential Field，APF）来优化快速扩展随机树（Rapidly-exploring Random Tree，RRT）搜索，例如 APF-RRT 算法通过动态标志偏置和贝塞尔曲线平滑提升了路径质量^[33]。黄昱航^[34]等提出将双向搜索策略引入 A* 算法，并结合动态窗口法（Dynamic Window Approach，DWA）改进启发函数，实现了全局障碍规避与路径优化。李炯逸^[35]等还提出了针对室内环境的改进双向 A* 算法，通过综合距离启发实现了更高的搜索效率和路径质量。

上述代表性路径规划算法的主要特征及比较见表 4。

表 4 机器人路径规划技术研究现状

路径规划算法	主要特点	技术优势	局限与适用场景
改进蝴蝶优化算法 ^[31]	采用 Tent 映射初始化种群，引入动态香味值和遗传选择加速全局搜索	收敛速度快，路径多样性高	算法参数多，适用于环境动态变化不剧烈的场景
IBWO+TEB ^[32]	利用改进白鲸优化算法进行全局规划，再用改进的 TEB 算法局部平滑	能找到全局最优路径且路径平滑	算法复杂度高，计算量大；对实时性要求高的场景适应一般
DGBAPF-RRT ^[33]	基于动态目标偏置与改进人工势场的 RRT 算法，引入三阶贝塞尔曲线	路径质量好，适合动态目标跟随	参数依赖性强，对动态目标变化敏感
A*+ 动态窗口 ^[34]	将双向 A* 与动态窗口法融合，采用综合距离启发函数和全局路径筛选	兼顾全局避障与局部路径优化，提升路径最优性	依赖启发函数设计，可能陷入局部最优
改进双向 A* ^[35]	针对室内环境改进双向 A* 算法，引入二次规划提升搜索效率	搜索速度快，路径质量高	对环境障碍分布敏感，适用重复搜索场景

从表 4 可见，各种优化与搜索策略在复杂环境下对路径规划均有增强作用：如全局优化算法可避免陷入局部最优，而融合动态窗口的方法能进一步保障避障能力。然而，这些方法往往计算量大、参数调试困难，实时性和稳定性成为需要平衡的关键问题。因此，在实际应用中往往需要结合具体场景动态选择合适的规划算法，或进行算法简化以适应实时跟随需求。

3 跟随机器人关键挑战

随着跟随机器人在现实场景中的广泛部署，其运行环境日益复杂化，不可避免地面临一系列关键技术瓶颈。相比于实验室内的理想环境，真实应用中往往伴随环境扰动频繁、目标行为变化剧烈、任务持续时间较长，以

及与人类交互行为多样等问题，这些因素均对机器人的跟随能力提出了更高要求。现有研究在提升感知精度、响应速度、导航鲁棒性和交互自然度方面虽取得了一定进展，但仍存在诸多挑战亟待解决。

为更直观地呈现当前跟随机器人常见的挑战类型，本节总结了四类关键挑战，如图 3 所示，包括感知精度受环境干扰、目标快速运动导致的响应滞后、长时间跟随中的定位误差累积，以及人机交互缺乏自然感。这些问题不仅影响机器人在复杂场景下的跟随稳定性和用户体验，也对后续系统设计和控制策略提出了新的要求。这四类关键挑战的具体表现、研究挑战与典型解决策略见表 5，便于对比分析与系统梳理。

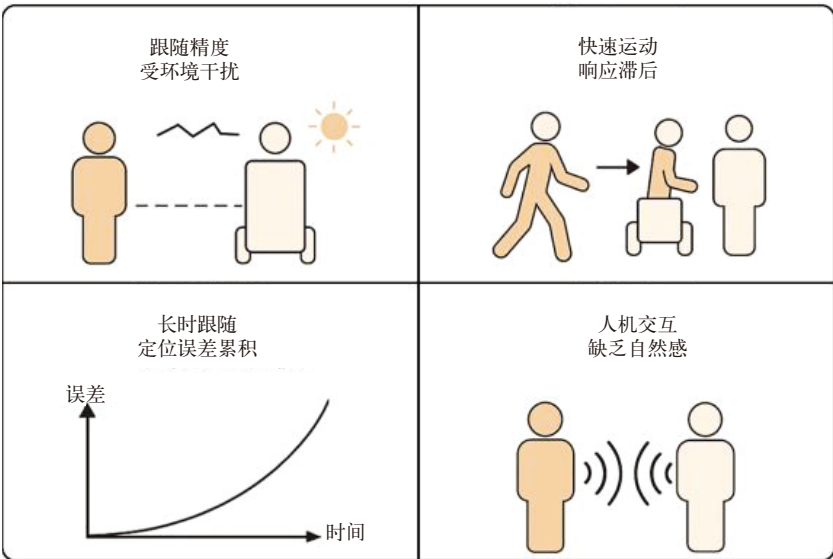


图 3 跟随机器人的关键挑战

表 5 跟随机器人的关键挑战

关键挑战	具体表现	研究挑战	典型策略
跟随精度受环境干扰	光照变化、背景复杂、目标遮挡，导致检测与跟踪不稳定，出现误识或目标丢失	提升感知鲁棒性与多源融合实时性	关键点预测 ^[37] 、多模板融合 ^[38]
目标快速运动导致的响应滞后	目标加速或环境突变引起响应延迟，表现为跟丢目标或追随动作不连贯	增强预测能力，兼顾快速与安全	卡尔曼预测 ^[39] 、轻量网络 ^[40] 、快追踪架构 ^[41]
长时间跟随中的定位误差累积	长时运行中定位误差累计、目标消失后难以重识别，以及续航与硬件过载问题	控制误差积累，调度续航与疲劳	轨迹预测 ^[42] 、ReID 识别 ^[43] 、自主充电 ^[44]
人机交互缺乏自然感	机器人跟随距离不合理、不避让行人、对话音手势指令响应迟缓，影响用户舒适度	建模社交空间，优化多模态交互	距离控制 ^[45] 、社会力模型 ^[46] 、语音手势识别 ^[47]

3.1 跟随精度受环境干扰的应对方法

跟随机器人在复杂环境中常受到光照变化、背景杂乱、目标遮挡和尺度变化等因素干扰，导致对目标的检测和跟踪精度明显下降，甚至出现目标丢失。如图 4 所示，在购物中心或机场等场景，灯光明暗的剧烈切换、繁杂的背景人群及目标人物被其他行人短暂遮挡，都可能使机器人的视觉传感器无法稳定捕捉目标的位置。这种干

扰机制在于：视觉检测器和跟踪算法对目标外观的依赖较强，当环境引入超出算法鲁棒性范围的噪声或变化时，算法容易产生误检或漏检，从而破坏连续跟踪。因此，在动态多变的真实场景下保持稳健的目标感知是极具挑战性的任务，需要先进的多传感融合和自适应算法来抵抗环境扰动的影响^[36]。

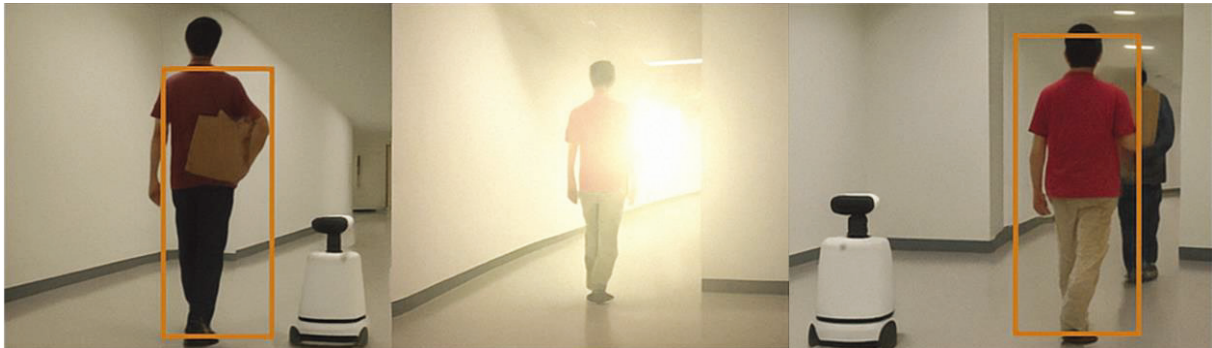


图 4 遮挡与光照干扰下的目标识别丢失问题

为提高鲁棒性，近年来融合多源信息和深度学习的方法受到重视。例如，Ye^[37] 等针对部分遮挡问题利用人体关键点检测与滤波预测持续定位目标，在目标被遮挡时仍能根据可见关节推断其位置，从而增强跟踪的连续性。又如，Cao^[38] 等提出一种多模板更新的视觉跟踪算法通过在线收集可靠的正负模板并融合响应，提高了对目标和相似干扰物的区分能力，即使在动态背景和光照变化下也能保持稳健跟踪，同时，深度学习检测器结合重识别技术被用于区分环境中外观相似的行人，降低背景干扰对跟随精度的影响。这些感知与跟踪策略有效提升了机器人在光照剧变、遮挡频发等环境下的跟随准确性和鲁棒性。

3.2 目标快速移动与剧烈场景变化下的算法响应优化

跟随目标的突然加速或环境的剧烈变化会对机器人的实时响应能力提出严峻挑战。当目标高速移动时，传统视觉跟踪算法容易因运动模糊或视野瞬间偏离而无法及时捕捉目标，导致跟丢或跟随滞后现象。如图 5 所示，在户外场景中，如果被跟随者突然开始奔跑或快速转弯，机器人可能因自身感知与决策滞后而落后许多步，甚至暂时失去目标位置。其影响机制在于：目标高速运动压缩了机器人感知-计算-执行的时间窗口，如果算法处理频率跟不上目标变化速度，就会产生延迟累积，无法同步目标步伐。这不仅造成跟随距离拉大、响应滞后，还可能引发安全隐患。高动态场景下及时、稳定地响应目

标运动是一个重要挑战：系统需要比平常更快地感知和决策速度，以及对目标轨迹的预判能力，才能避免跟随滞后。这要求采用高速传感器和高效算法，以提高数据处理帧率，并通过预测模型提前规划运动同时，机器人

自身也必须能快速调整运动轨迹并即刻避障，以在保持追随的同时确保安全高速跟随还意味着机器人运动速度加快，因此在复杂环境中更需慎重避免撞击——如何兼顾快速响应和安全避障成为一大难题。

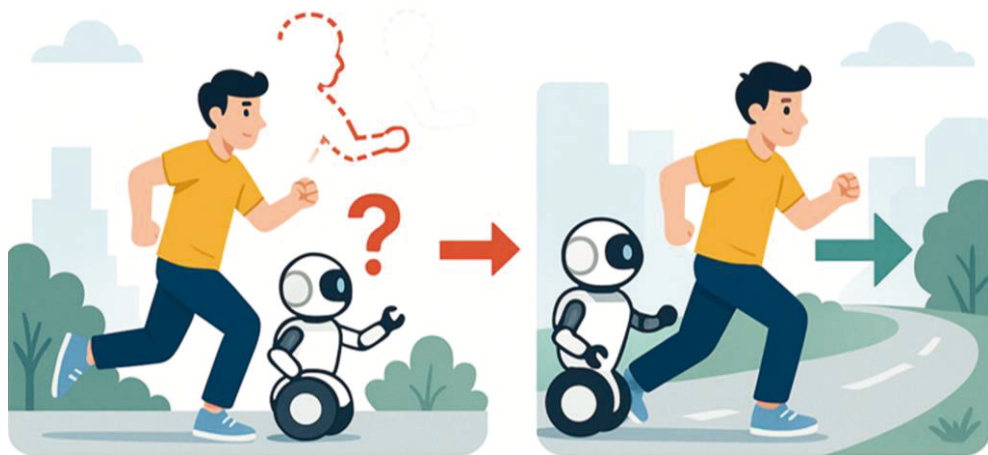


图5 目标快速运动下机器人响应滞后与丢失跟随示意图

一方面，研究者引入卡尔曼滤波等运动预测模型来提前估计目标位置，在视觉检测间隙也能更新目标状态，从而缓解快速运动带来的跟踪延迟^[39]。另一方面，新近提出的轻量级跟踪网络将目标检测、ReID特征提取与多帧注意力预测相结合，既提高了检测速度又能利用上一帧信息预测当前目标位置，大幅增强了算法在剧烈场景变化下的实时跟踪性能^[40]。此外，还有系统采用“慢检测+快追踪”架构：利用深度神经网络进行高精度人员检测，同时并行运行高帧率的光学流跟踪来猜测两次检测之间的目标位移，从而实现平滑实时的跟随控制^[41]。通过以上优化策略，跟随机器人即使面对目标突然加速或环境迅速改变的情况，仍能保持及时、稳定地响应，避免跟丢目标或出现明显滞后。

3.3 长距离长时间跟随中的误差累积与疲劳问题对策

在长距离、长时间的人体跟随任务中，如图6所示，机器人面临定位误差逐步累积、目标长时间离开视野以及自身能耗与机械负荷增加等挑战。长时间连续运行会使传感器测距误差和视觉漂移不断积累，导致机器人对自身和目标的相对定位逐渐失准；如果目标人员因转弯、遮挡或进入人群而长时间消失在传感器视野中，机器人可能难以及时重新找到目标，造成跟丢。此外，长时间

不间断工作对机器人的续航电源和驱动部件也是严峻考验：电池电量可能在任务中耗尽，电机和传动部件由于持续运转和频繁启停而出现过热或磨损。这些问题在例如仓储巡逻或户外导引等需要持续数小时跟随的应用中尤为典型：如果没有特殊设计，机器人可能因为定位渐渐偏移或电量不足，在任务后期跟不上目标。上述现象背后的影响机制在于：传感与定位误差的积累是不可避免的，尤其当外部定位辅助缺乏时，小的姿态误差会随里程增长放大，最终影响跟随精度；而长时间的目标中断会使跟踪器的状态估计完全失去依据，从而无法恢复目标。能量耗散和硬件疲劳属于长期运行的物理限制，如果不加以管理，会直接导致任务被迫中断或设备损坏。因此，长时跟随要求在导航算法上具备对目标暂时消失的自恢复能力，以及在系统设计上具备持续运行管理能力，包括能源补给与硬件保护。

针对定位漂移和目标丢失问题，研究者引入了轨迹预测和再识别机制：当目标拐弯出视野时，机器人根据其历史运动轨迹预测可能的行进方向，主动规划路径继续跟随，而不只是原地等待目标重现^[42]。这种在线轨迹预测与路径规划方法可帮助机器人在目标暂时消失后及时“绕角”重新捕获目标。同时，集成人体重识别技术使机器人即使经历长时间分离后再次遇到目标人群，也

能凭借外观特征将其识别出来，减少长时间运行中因人员混杂导致的跟丢。针对持续运行的能耗和硬件负担问题，也有工作将自主充电规划和节能控制纳入系统：通过多目标决策为机器人安排充电时机，在保证跟随任务不中断的前提下延长续航时间^[43]。此外，运动控制上优

化速度曲线以避免频繁急启急停，既降低电机和电池负荷又保证跟随平稳。综合这些导航、动力和能源管理策略，可有效缓解长时间跟随带来的误差积累和硬件疲劳，保证任务的连续性和可靠性^[44]。

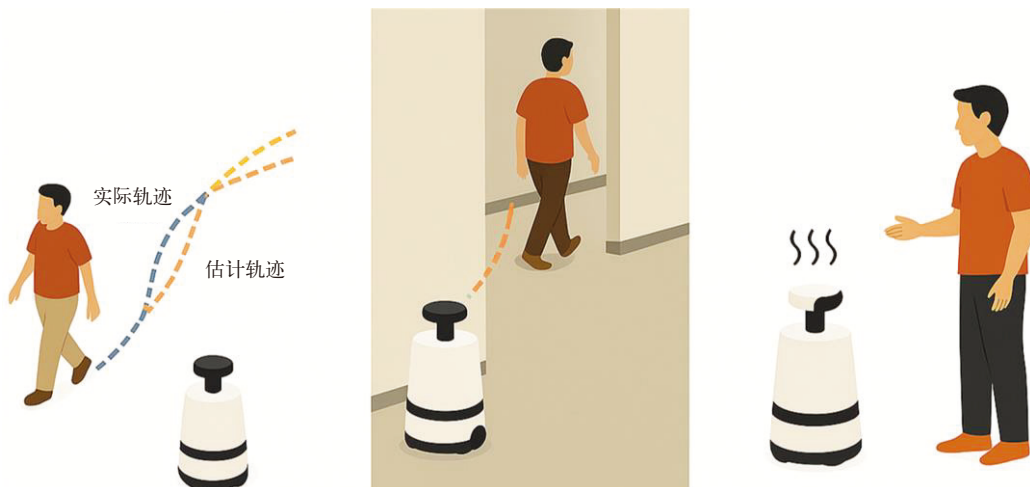


图6 长距离长时间跟随任务中定位误差、目标丢失与疲劳问题示意图

3.4 人机交互中的社交空间、安全性与自然度

在人与机器人跟随交互过程中，如图7所示，机器人不仅要完成跟踪任务，还应遵循人类的社交礼仪，以保持合适的跟随距离，确保行为的安全性和自然性。如果机器人跟得过近，可能侵入人类的私人空间，让人感到不适甚至不安全；反之跟得过远，又会削弱互动效果，增加目标丢失的风险。此外，机器人应以让人舒适的方式移动和回

应指令，如同一个有“社交智商”的伙伴，而非生硬机械地尾随。这一问题在本质上反映了当前跟随机器人社交意识的不足：传统导航与控制多偏重避障和最优路径，对人类行为模式和心理舒适度缺乏考虑。因此，提高跟随过程的人机交互自然度要求机器人在导航决策中引入对人类社交规范的理解，包括维持适当距离、路线选择上礼让行人，以及对人类意图做出友好的反馈。

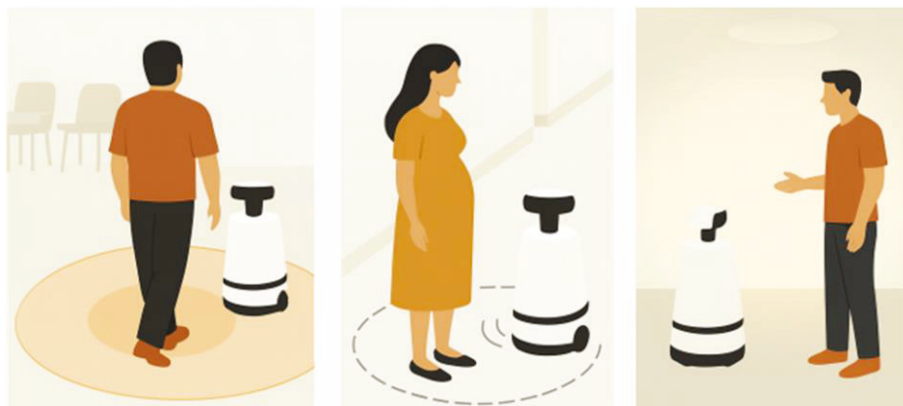


图7 人机交互中的社交空间、安全性与自然交互行为示意图

为此，研究者建立了符合人类社交空间的距离模型，让机器人根据人与环境动态调整跟随距离：既不过分逼

近导致受试者不适，也不掉得太远影响交流。例如，有研究在控制器中融入修改后的个人空间分布模型，结合

对行人速度的感知来实时调整机器人的前进速度和距离, 保证机器人始终位于合适的跟随距离并将人保持在视野中央, 以实现令人舒适的跟随动作^[45]。安全性方面, 跟随算法与避障策略相结合: 机器人在追随目标人的同时使用激光雷达等传感器感知周围障碍物和其他行人, 及时规划避碰路径, 避免出现撞人或碰撞危险。另外, 通过引入社会力模型或在局部路径规划中设定行人动力学约束, 机器人能以符合人类预期的方式绕行静态和动态障碍, 实现“礼让”的跟随移动^[46]。自然交互方面, 许多系统增加了多模态人机交流机制, 如手势识别和语音反馈: 在人发出跟随/停止手势或口头指令时, 机器人可以识别并做出相应动作, 并通过语音给予确认回应, 使交互更加直观友好^[47]。实证研究表明, 经过上述社交距离建模、安全避障及自然交互设计的机器人跟随行为在主观测评中获得了更高的舒适度和可接受性, 能更好融入有人环境并让用户感到安全和自在。

4 总结与展望

跟随机器人作为具身智能机器人领域的重要分支, 其研究涵盖感知、控制、建图和规划等关键技术。本文系统综述最新进展, 重点比较典型感知方案、控制策略、定位建图和路径规划方法, 总结了各自的优势与局限。研究趋势表明: 感知层面正向多传感器融合、深度学习跟踪方向发展; 控制策略需要在融入学习算法以提升控制模型的鲁棒性; 定位与建图方面多采用激光与视觉SLAM融合的方案; 路径规划则倾向于混合优化与传统搜索方法以平衡全局最优性与实时性。当前研究虽然取得突破, 仍需解决复杂场景下保持长期稳定跟随、提高人机交互自然度和系统可靠性等关键问题。

未来研究可从以下几方面展开: ①优化跟踪算法在多变环境中的精度与延迟, ②通过行为识别和情感理解提升社交交互能力, ③探索基于5G/物联网的多机器人协同跟随或云端远程控制方案, ④提升硬件耐用性并降低系统成本以加速推广。随着具身智能技术的进步, 未来的跟随机器人将向更高智能化、高效化、实用化发展, 为人类生产生活提供新动力。IM

参考文献

- [1] EIRALE A, MARTINI M, CHIABERGE M. Human following and guidance by autonomous mobile robots: A comprehensive review[J]. IEEE Access, 2025 (13): 42214-42253.
- [2] RAFAI T, LUKASZ R, ANDRZEJ T. Configuring a UWB based location system for a UGV operating in a follow-me scenario[J]. Energies, 2021, 14 (17): 5517.
- [3] 陈少华, 陈逸凡, 林木泉. 一种物料搬运自动跟随机器人装置的设计[J]. 数字技术与应用, 2021, 39 (9): 7-9.
- [4] 王宇航, 李峥, 王喆, 等. 一组跟随式移动机器人系统的设计方法[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2021, 21 (8): 80-83.
- [5] 徐胜, 邢强, 王浩. 基于环形红外阵列的移动机器人自动跟随系统[J]. 工程设计学报, 2022, 29 (2): 247-253.
- [6] 汪庆海, 杨芳艳. 异构低能耗的跟随机器人系统设计[J]. 电子科技, 2022, 35 (10): 8-14.
- [7] RICHTER J, BOHLIG D, NÜCHTER A, et al. Edge detection of apriltags for precise docking maneuvers of mobile robots[J]. IFAC-PapersOnLine, 2022, 55 (8): 117-123.
- [8] 武泱光, 黄宇新, 张俊辉, 等. 全向自主跟随智能车设计[J]. 物理通报, 2023 (4): 155-156, 161.
- [9] LI S, MILLIGAN K, BLYTHE P, et al. Exploring the role of human-following robots in supporting the mobility and wellbeing of older people[J]. Scientific Reports, 2023, 13 (1): 1-16.
- [10] JIANG Q, SUSAM B, CHAO J J, et al. Map-aware human pose prediction for robot follow-ahead[C]//2024 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). New York: IEEE, 2024: 13031-13038.
- [11] SU Z, YAO H, PENG J, et al. LQR-based control strategy for improving human-robot companionship and natural obstacle avoidance[J]. Biomimetic Intelligence and Robotics, 2024, 4 (4): 1-10.
- [12] PRIYANDOKO G, WEI C K, ACHMAD M S H. Human following on ros framework a mobile robot[J]. Sinergi, 2018, 22 (2): 77-82.
- [13] ZHU Z, MA H, ZOU W. Human following for wheeled robot with monocular pan-tilt camera[J/OL]. (2019-09-

- 13)[2025-07-10].<https://arxiv.org/abs/1909.06087>.
- [14] TSAI T H, YAO C H. A robust tracking algorithm for a human - following mobile robot[J]. IET Image Processing, 2021, 15 (3): 786-796.
- [15] LAI D, ZHANG Y, LIU Y, et al. Deep learning-based multi-modal fusion for robust robot perception and navigation[J/OL]. (2025-04-26)[2025-07-10]. <https://arxiv.org/abs/2504.19002>.
- [16] HUANG Z, OU C, GUO Z, et al. Human-following strategy for orchard mobile robot based on the KCF-YOLO algorithm[J]. Horticulturae, 2024, 10 (4): 1-24.
- [17] AKABANE R, KATO Y. Pedestrian trajectory prediction based on transfer learning for human-following mobile robots[J]. IEEE Access, 2021 (9): 126172-126185.
- [18] KITAMOTO S, HIROI Y, MIYAWAKI K, et al. Robust human tracking using a 3D LiDAR and point cloud projection for human-following robots[J]. Sensors, 2025, 25 (6): 1-15.
- [19] FENG T, YU Y, WU L, et al. A human-tracking robot using ultra wideband technology[J]. IEEE Access, 2018 (6): 42541-42550.
- [20] HERRERA D, ROBERTI F, TOIBERO M, et al. Human interaction dynamics for its use in mobile robotics: Impedance control for leader-follower formation[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2017, 4 (4): 696-703.
- [21] 姚瀚晨, 彭建伟, 戴厚德, 等. 基于改进弹簧模型的移动机器人柔顺跟随行人方法 [J]. 机器人, 2021, 43 (6): 684-693.
- [22] 廖哲霖, 彭建伟, 姚瀚晨, 等. 基于导纳控制的社交机器人伴随与避障控制策略 [J]. 机器人, 2024, 46 (3): 305-316.
- [23] CHEN H, WANG X, ZHAO L, et al. Research on path tracking control of mobile storage robot based on model predictive control and linear quadratic regulator[C]//5th International Conference on Information Science, Electrical, and Automation Engineering (ISEAE 2023). Washington: SPIE, 2023, 12748: 660-666.
- [24] 赵恩铭, 姚志强, 杨松, 等. 基于机器视觉的自动目标跟随系统设计与实现 [J]. 大理大学学报, 2022, 7 (6): 42-47.
- [25] PENG J, LIAO Z, SU Z, et al. A Dual closed-loop control strategy for human-following robots respecting social space[C]//2024 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). New York: IEEE, 2024: 11252-11258.
- [26] CHENG J, ZHANG M, MA L, et al. A hybrid-dimensional laser slam framework for indoor quadruped inspection robots[J]. IEEE Sensors Journal, 2024, 24 (10): 16935-16942.
- [27] AL-TAWIL B, HEMPEL T, ABDELRAHMAN A, et al. A review of visual SLAM for robotics: Evolution, properties, and future applications[J]. Frontiers in Robotics and AI, 2024 (11): 1-18.
- [28] WANG Y, LOU Y, SONG W, et al. A LiDAR-inertial SLAM tightly coupled with dropout-tolerant GNSS fusion for autonomous mine service vehicles[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023 (72): 1-15.
- [29] LV J, LANG X, XU J, et al. Continuous-time fixed-lag smoothing for LiDAR-inertial-camera SLAM[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2023, 28 (4): 2259-2270.
- [30] GANESAN S, RAMALINGAM B, MOHAN R E. A hybrid sampling-based RRT* path planning algorithm for autonomous mobile robot navigation[J]. Expert Systems with Applications, 2024 (258): 1-12.
- [31] 魏博, 汤荣杰, 郑英豪, 等. 基于改进蝴蝶优化算法的移动机器人路径规划 [J]. 北京工业大学学报, 2025, 51 (3): 295-307.
- [32] 梁凯, 韩西. 基于IBWO-TEB算法的移动机器人自主路径规划 [J]. 制造技术与机床, 2025 (3): 49-55.
- [33] FAN J, CHEN X, LIANG X. UAV trajectory planning based on bi-directional APF-RRT* algorithm with goal-biased[J]. Expert Systems with Applications, 2023 (213): 1-12.
- [34] 黄昱航, 李国刚, 焦启, 等. 融合距离引导式A*算法与动态窗口法的移动机器人路径规划 [J]. 华侨大学学报 (自然科学版), 2025, 46 (1): 87-94.

- [35] 李炯逸, 李强, 张新闻, 等. 移动机器人用改进的双向 A* 二次路径规划算法 [J]. 系统仿真学报, 2025, 37 (2): 498-507.
- [36] 万琴, 李智, 李伊康, 等. 基于改进 YOLOX 的移动机器人目标跟随方法 [J]. 自动化学报, 2023, 49 (7): 1558-1572.
- [37] YE H, ZHAO J, PAN Y, et al. Robot person following under partial occlusion[J/OL]. (2023-02-27) [2025-07-10].<https://arxiv.org/abs/2302.02121>.
- [38] CAO M, WANG J, MING L. Multi-templates based robust tracking for robot person-following tasks[J]. Applied Sciences, 2021, 11 (18): 1-16.
- [39] TSAI T H, YAO C H. A robust tracking algorithm for a human - following mobile robot[J]. IET Image Processing, 2021, 15 (3): 786-796.
- [40] WAN Q, LI Z, WANG Y, et al. A fast tracking network for pedestrian following of mobile robot in unknown complex scenes[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2024, 20 (11): 12726-12735.
- [41] CONDÁS I, FERNÁNDEZ-CONDE J, PERDICES E, et al. Robust person identification and following in a mobile robot based on deep learning and optical tracking[J]. Electronics, 2023, 12 (21): 1-24.
- [42] ALGABRI R, CHOI M T. Target recovery for robust deep learning-based person following in mobile robots: Online trajectory prediction[J]. Applied Sciences, 2021, 11 (9): 1-19.
- [43] YE H, CAI K, ZHAN Y, et al. Rpf-search: Field-based search for robot person following in unknown dynamic environments[J/OL]. (2025-07-11)[2025-07-12]. <https://arxiv.org/abs/2503.02188>.
- [44] TOMY M, LACERDA B, HAWES N, et al. Battery charge scheduling in long-life autonomous mobile robots via multi-objective decision making under uncertainty[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2020 (133): 1-5.
- [45] MONTESDEOCA J, TOIBERO J M, JORDAN J, et al. Person-following controller with socially acceptable robot motion[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2022 (153): 1-12.
- [46] ROLLO F, ZUNINO A, RAIOLA G, et al. Followme: A robust person following framework based on visual re-identification and gestures[C]//2023 IEEE International Conference on Advanced Robotics and Its Social Impacts (ARSO). New York: IEEE, 2023: 84-89.
- [47] KÄSTNER L, FATLOUN B, SHEN Z, et al. Human-following and-guiding in crowded environments using semantic deep-reinforcement-learning for mobile service robots[C]//2022 International Conference on Robotics and Automation (ICRA). New York: IEEE, 2022: 833-839.
-
- 作者简介: 张思龙 (2000—), 男, 硕士, 主要研究方向为机器人路径规划、机器人智能跟随、人机共融等。
姚瀚晨 (通信作者) (1996—), 男, 博士, 主要研究方向为机器人社交导航、机器人自主决策、具身智能等。
收稿日期: 2025-07-28