

doi: 10.7690/bgzdh.2026.04.018

自主跟随四足机器人智能感知技术研究综述

唐子清¹, 张瀚铭¹, 刘治红¹, 潘献飞²

(1. 中国兵器装备集团自动化研究所有限公司长沙分公司, 四川 绵阳 621000;

2. 国防科技大学智能科学学院, 长沙 410073)

摘要: 为解决四足机器人感知系统易受到运动噪声干扰、视角受限及计算资源约束而导致传统算法难以直接应用的问题, 围绕“目标-本体-环境”的智能感知技术体系进行研究分析。通过梳理相关技术的最新研究进展, 分析目标定位、目标跟踪、目标重识别以及同时定位与建图(simultaneous localization and mapping, SLAM)等关键技术方法, 探讨其在四足机器人上的应用特点、技术瓶颈及优化方向。结果表明, 该分析为智能移动机器人领域发展注入新活动, 对未来发展提供有效参考。

关键词: 自主跟随; 四足机器人; 智能感知; 目标跟踪; SLAM

中图分类号: TP242.6 **文献标志码:** A

Survey of Intelligent Perception Technology for Autonomous Following Quadruped Robot

Tang Ziqing¹, Zhang Hanming¹, Liu Zhihong¹, Pan Xianfei²

(1. Changsha Branch, Automation Research Institute Co., Ltd. of China South Industries Group Corporation, Mianyang 621000, China; 2. College of Intelligence Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha, 410073, China)

Abstract: In order to solve the problem that the traditional algorithm is difficult to apply directly because the perception system of quadruped robot is vulnerable to motion noise interference, limited perspective and computational resource constraints, the intelligent perception technology system of “goal-ontology-environment” is studied and analyzed. By reviewing the latest research progress of related technologies, this paper analyzes the key technologies and methods of target localization, target tracking, target re-recognition and simultaneous localization and mapping (SLAM). The application characteristics, technical bottlenecks and optimization direction of quadruped robot are discussed. The results show that the analysis injects new vitality into the development of intelligent mobile robot and provides an effective reference for future progress.

Keywords: autonomous following; quadruped robot; intelligent perception; target tracking; SLAM

0 引言

在机器人技术蓬勃发展的当下, 四足机器人作为智能移动平台的重要分支, 展现出了相较于传统的履带式机器人和轮式机器人更强的灵活性和地形适应能力^[1]。这些独特优势使其在探险救援、军事侦察、工业巡检等领域展现出巨大的应用潜力^[2], 并逐步成为智能移动机器人领域的研究热点。从国外的 BigDog^[3]、Cheetah^[4]和 ANYmal^[5]到国内宇树科技的 Go 系列以及云深科技的绝影系列, 国内外研究者围绕四足机器人展开持续探索, 不仅印证了其技术可行性与市场潜力, 而且也凸显了该领域作为机器人技术前沿阵地的战略地位。

自主跟随是指在无需人工干预的情况下, 机器人能够自动识别并实时跟踪一个或多个目标, 并在复杂和动态的环境中保持与目标相对位置和距

离^[6]。该技术在人机协作、自主物流和多机协同等领域具有重要意义, 可显著降低人力依赖、提升任务效率并保证人员安全。自主跟随机器人的感知技术主要包括目标感知、本体位姿估计以及环境感知, 为后续的路径规划与运动控制提供精确的数据支持, 是实现高效、长时间稳定跟随的基础, 具有重要的研究价值^[7]。

现有自主跟随技术研究多聚焦于无人车与无人机场景, 针对四足机器人的相关研究相对匮乏。在执行跟随任务过程中, 由于其特殊结构和应用场景, 四足机器人感知系统面临着以下独特挑战:

1) 运动噪声干扰。机身运动引发的高频颤振易导致传感器数据失真, 同时足端触地产生的机械噪声也会干扰目标识别与位姿估计^[8]。

2) 视角受限。受限于本体高度, 四足机器人常

收稿日期: 2024-12-02; 修回日期: 2025-01-11

基金项目: 四川省科技计划项目(2024NSFTD0049); 中央引导地方科技发展资金(2023ZYDF003)

第一作者: 唐子清(1998-), 女, 四川人。

处于低位视角, 导致目标信息不完整, 增加了目标感知难度。

3) 计算资源受限。实时处理性能与计算资源之间难以平衡。

针对上述问题, 笔者系统梳理了自主跟随智能感知技术的最新研究进展, 通过解构“目标—本体—环境”感知体系, 提炼出关键技术框架, 并在此基础上深入分析四足机器人特点与感知需求, 揭示当前的技术瓶颈, 并提出优化方向。

按照所提框架, 笔者重点从 4 方面对自主跟随中涉及的核心智能感知技术进行分析:

1) 目标定位。目标定位用于确定“目标在哪里”, 为机器人提供初始目标状态和空间关系, 是自主跟随的起点。

2) 目标跟踪。目标跟踪解决“目标如何移动”的问题, 确保机器人能够在复杂环境中持续锁定目标, 并根据目标的运动趋势实时调整自身行为。

3) 目标重识别。目标重识别解决“目标暂时丢失后如何找回”的问题, 即在当目标因遮挡、距离过远或其他干扰因素丢失后, 能够重新识别并恢复对目标的跟踪。

4) 同时定位与建图(SLAM)。同时定位与建图解决“机器人自身在哪里”以及“周围环境是什么样”的问题, 为机器人自主导航与避障提供支持。

1 目标定位技术

自主跟随技术按照控制方式可以划分为位置伺服和图像伺服 2 种模式^[9]。位置伺服通过感知目标与机器人之间的相对位置来控制机器人运动, 而图像伺服则依据目标在图像中的位置信息作为控制依据。2 种控制模式皆高度依赖目标定位信息的准确性, 因此目标定位的精度直接影响机器人对目标的跟随效果。

1.1 基于视觉传感器的目标定位

基于视觉传感器的目标定位主要基于目标检测算法解析目标的类别和位置, 是当前最为常用的目标感知手段之一。

1.1.1 传统机器视觉方法

传统机器视觉方法通过手工设计算法提取目标的外观特征与运动特征以完成识别与定位任务。Alvarez 等^[10]利用 HSV 颜色空间模型和纹理特征构建目标模型, 并通过计算目标模型与检测结果之间的相似度完成目标判定; 针对四足机器人欠驱动特

性影响目标定位精度的问题, Zhang 等^[11]通过球面投影模型, 将视觉误差解耦为线性和角运动分量以提高定位稳定性。

近年来, 传统机器视觉方法逐渐被深度学习方法所取代, 但仍常与深度学习方法相结合使用。Redhwan 等^[12]融合颜色、空间位置等多维度特征, 结合在线增强学习实现相似目标区分; 钟沛成等^[13]将 YOLO 检测框架与目标外观模板、运动轨迹分析结合, 提升复杂场景跟随可靠性。

1.1.2 关节检测算法

当跟随目标为人类时, 关节检测技术可以通过提取人体关键点实现目标检测, 在部分遮挡场景仍保持较高检测精度, 尤其适配四足机器人低视角以及易受环境干扰的应用场景。这类方法往往需要额外的目标识别机制来区分特定目标。Ye 等^[14]采用 AlphaPose 搭配 YOLOX 算法, 构建高精度行人跟随系统; Liu 等^[15]则使用 OpenPose 搭配卷积通道特征和在线分类器提升检测效率。此外, 针对足式机器人在不平地形上行走时视觉系统坐标系随地形变化的问题, Zhao 等^[16]提出一种在线外参标定方法与 OpenPose 结合。该方法通过实时计算腿部支撑力判断足端触地状态, 构建自适应视觉坐标系, 为目标定位提供稳定数据基准。

1.1.3 SSD 算法

单次多框检测器(single shot multibox detector, SSD)作为经典单阶段多尺度检测框架, 因实时性与多尺度适应性成为目标定位优选方案。Luo 等^[17]利用其在不同特征图尺度生成锚框的机制, 在无人机平台上实现了高效目标检测。传统的 SSD 框架在面对目标尺度变化或发生遮挡时, 仍存在一定的鲁棒性不足问题。针对这一问题, Yang 等^[18]提出了基于 SSD 框架改进的 DSOD 算法。该算法无需依赖预训练模型, 通过引入密集连接的卷积网络以增强特征表达能力, 在四足机器人目标跟随任务中表现出良好性能。此外, 针对嵌入式平台计算资源受限的问题, Van 等^[19]采用轻量化的 MobileNet-SSD 模型进行目标检测, 该方法在保持较高检测精度的同时显著降低了计算开销。

1.1.4 YOLO 系列算法

YOLO 系列算法凭借高实时性、能够有效识别不同尺寸与形态的目标以及支持图像中多个目标的同步检测的能力, 已成为目标跟踪任务重应用最广

泛的解决方案之一。Zhang 等^[20-21]基于 YOLOv5 与 YOLOv3 实现了目标跟随。YOLO 的高效推理通常依赖于 GPU 等高性能硬件,在四足机器人等计算资源受限的平台部署面临挑战。为此,Daramouskas 等^[22]通过融合 YOLOv4 特征表达能力与 YOLOv7-tiny 轻量优势,在保证效率的同时提升了检测性能。此外,YOLO 在小目标检测方面存在一定局限性,尤其在复杂背景或远距离场景中表现受限。Yan 等^[23]提出 PLOD-YOLO 算法,通过引入 RBAM 模块增强空间特征感知能力,并结合 LM-BiFPN 实现多尺度特征融合,有效提升了小目标检测效果。

基于视觉传感器的目标定位技术具有信息丰富、响应速度快、易于集成等优点,但也存在一定的局限性。例如,其性能易受光照变化、遮挡、目标尺度变化等因素影响,在低纹理、远距离或动态背景下可能出现定位误差,且部分算法计算复杂度较高。

1.2 基于激光雷达的目标定位

激光雷达能够提供高精度的距离测量和丰富的 3 维点云数据,基于激光雷达的定位方法可在完成目标识别后直接获取目标的空间位置信息。

1.2.1 传统点云处理方法

在室外复杂环境下,点云聚类与特征提取是实现目标定位的经典技术路线,通过深入分析点云的空间分布形态、点间平均距离、点集规模等特征,从而将目标从复杂环境背景中有效分离出来。针对激光雷达在目标外观相似的情况下难以区分目标的问题,Pak 等^[24]在基于密度聚类算法初步检测到目标后,为目标分配唯一标识符,并通过实时更新标识符的方式实现持续跟随;另佳^[25]采用引入自适应聚类半径改进欧氏聚类算法,结合反射强度特征以及基于主成分分析的姿态估计,并要求领航人员佩戴反光材料的方式以增强目标可识别性。此外,为适应四足机器人在跟随过程中的地形变化,研究者还提出了一种改进的基于地面平面拟合的地面分割方法,该方法将空间沿水平方向分割成多个子平面,并对每个子平面分别进行地面平面拟合,以减少地面点云干扰目标识别。为解决室内走廊转角目标丢失问题,Yao 等^[26]在支持向量数据描述结合几何特征检测目标人腿部的基础上引入点云聚类检测走廊,以便在目标接近转角时触发并肩跟随模式。

1.2.2 集成学习方法

由于复杂环境中激光雷达采集的点云数据通常较为稀疏,导致目标识别面临较大挑战,部分研究者采用先对点云进行聚类处理并提取候选区域,再结合特征提取和集成学习算法进行分类的方法,以提高目标识别的准确率。Toan 等^[27]使用欧几里得聚类算法与密度聚类算法对点云进行分割,并利用随机森林分类器结合几何特征对后续点云簇进行分类;Gong 等^[28]则设计了一个低维且易于计算的 21 维特征空间,并采用 AdaBoost 训练二元分类器,用于区分目标人物与其他物体。这些方法在行人跟随任务中均取得了良好效果。

1.2.3 深度学习方法

随着深度学习技术的快速发展,其在基于激光雷达定位目标的应用也逐渐增多。深度学习能够自动提取高维特征,适用于处理复杂的非结构化点云数据。针对激光雷达点云数据较为稀疏的问题,Chen 等^[29]提出了一种对点云稀疏性不敏感的体素特征来描述点云簇的 3 维信息,并设计了一个 U 形卷积神经网络用于从稀疏点云中检测行人,实现了较高的识别准确率。在拥挤或杂乱的环境中,激光雷达数据难以区分人腿和障碍物,容易产生误检。Park 等^[30]提出一种基于 PointVoxel-RCNN 的 3 维人腿检测框架。该方法即使在点云数据稀疏的情况下也能保持较高的检测精度,显著提升了复杂环境下的识别性能。

基于激光雷达目标定位的优势在于其高精度的测距能力,且不受光照条件影响,适用于多种复杂场景。这类方法也存在局限性,例如激光雷达成本较高、功耗较大、点云数据复杂度较高以及难以区分不同目标等问题。

1.3 基于超宽带技术(UWB)的目标定位

基于 UWB 的目标定位原理是通过 UWB 标签与锚点间的信号传播时间差或载波相位差构建双曲线定位模型解算目标坐标。传统双曲线定位算法受测距误差累积影响,在多锚点协同定位时易出现解算偏差。为突破这一技术瓶颈,近年来众多研究围绕算法优化与模型创新展开。Feng 等^[31]提出了一种改进双曲线定位算法。该算法通过 2 个锚点计算可能的交点并利用第 3 个锚点进行验证的方式,有效减少了由第 3 个锚点引入的误差,从而提高了定位精度。在此基础上,Dang 等^[32]结合 CRS 控制器实

现了无需先验地图信息的室内自主跟随系统。针对传统双基站模型在目标跟随过程中可能导致机器人背离目标移动的问题,刘关迪等^[33]提出了一种等边三角形布局的三基站定位模型,该方法减少了输入参数的数量,直接通过几何关系计算目标位置。此外,为解决视觉和激光雷达等定位手段在多目标场景中容易出现识别混淆的问题,Li 等^[34]在四足机器人平台上采用 UWB 定位技术进行目标跟随。该团队在三基站定位模型的基础上引入加权最小二乘法,通过计算加权矩阵补偿外部干扰对定位结果的影响,进一步提升了定位精度。

基于 UWB 的目标定位方法具有高精度、抗干扰能力强、无需视距条件等优点,但也存在部署成本高、覆盖范围有限、需预先布置锚点等局限,限制了其在部分移动平台上的灵活应用。

1.4 基于多传感器融合的目标定位

综上所述,基于不同传感器的目标定位技术各有其独特优势和局限性。自主跟随四足机器人通常需要在地形复杂、非结构化环境中运行,这对感知系统的鲁棒性和适应性提出了更高要求。近年来多传感器融合技术逐渐成为自主跟随系统的重要发展方向,该技术通过整合各传感器的优势,显著提升了目标定位的精度和稳定性。表 1 详细总结了常见传感器在目标定位中的特点,为后续融合策略的设计提供了依据。

表 1 单一传感器目标定位技术优缺点对比

传感器类型	优势	局限性
视觉传感器	信息丰富、成本低	受光照影响大、遮挡鲁棒性差
激光雷达	高精度测距、抗光照干扰	成本高、点云处理复杂
UWB	厘米级定位、抗干扰能力强	覆盖范围有限、易受多径干扰

1.4.1 视觉传感器与激光雷达融合

针对传统视觉与激光雷达方法在光照变化和复杂环境下存在稳定性不足、容错性差的问题,Zhu 等^[35]将检测到的目标点云位置与单目相机检测到的目标边界框进行匹配,从而实现更稳定的目标跟随。Zhang 等^[36]构建了一个基于自适应联邦滤波器的多传感器融合框架。该方法通过检测环境亮度动态调整视觉传感器与激光雷达在融合过程中的权重,从而在不同光照条件下保持稳定的检测性能。此外,考虑到四足机器人在复杂地形行走时产生的高频振动可能影响传感器数据质量,研究团队还设

计了一种故障检测与隔离算法,能够实时识别并隔离故障传感器,防止其对系统整体性能造成影响。

1.4.2 视觉传感器与 UWB 融合

Sarmiento 等^[37]提出了一种基于范围直方图滤波器的融合方法,用于整合 UWB 与单目相机的数据。该方法有效降低了 UWB 的角度测量误差,同时弥补了视觉系统在遮挡情况下的缺陷,实现了更稳定的定位输出。Janousek 等^[38]则通过 ROS 框架对 UWB 和 RGB-D 相机的数据进行同步与融合,生成最终的目标位置信息。该方法在 UWB 信号受干扰时,能够依赖 RGB-D 数据辅助定位,从而增强系统的鲁棒性。刘凯^[39]提出了一种根据视觉与 UWB 定位偏差大小自适应选择融合策略的方法。在此基础上,系统还能根据偏差方向和幅值的变化,动态调整加权系数,进一步提升定位精度。

2 目标跟踪技术

目标跟踪技术是在目标检测的基础上,通过连续的图像帧或传感器数据计算目标的运动方向、速度和位置变化,以实现目标位置的实时预测和跟踪。该技术能够确保机器人在目标移动过程中始终保持对目标的锁定,即使目标暂时被遮挡或进入视野边缘,也能通过预测算法快速恢复跟踪。

2.1 基于相关滤波器的目标跟踪

基于相关滤波器的方法通常与轻量级的目标识别方法结合使用,通过频域计算实现快速跟踪,具有较高的实时性和计算效率,适用于资源受限的嵌入式系统。目标跟踪过程中存在光照变化、目标尺度变化、目标外观变化以及多目标干扰等问题。为解决这些问题,Cheng 等^[40]采用快速判别尺度空间跟踪算法处理上身尺度变化问题,并结合核相关滤波器(KCF)与颜色特征来增强双脚跟踪性能。杨彤等^[41-42]则通过多特征融合和多尺度估计策略,进一步优化了 KCF 算法,使四足机器人在室外复杂环境下仍能稳定跟踪领航员。针对传统方法易过拟合且速度慢的问题,Jiang 等^[43]引入高效卷积算子跟踪算法(ECO),有效提升了算法在目标漂移或部分遮挡情况下的稳定性。Han 等^[44]在此基础上,结合直方图定向梯度与颜色名称特征,进一步增强了 ECO 算法的鲁棒性。

尽管此类方法具备良好的实时性,但在目标快速移动、形变或长时间遮挡时仍存在丢失目标的风险,且对背景干扰较为敏感。

2.2 基于运动模型的目标跟踪

基于运动模型的方法通过建模目标的运动轨迹进行状态预测，这类方法尤其擅长应对目标短暂消失或遮挡的情况。为排除相似目标干扰，Pang等^[45]将YOLO检测到的行人边界框与卡尔曼滤波器(KF)预测的位置进行匹配。考虑到KF算法难以处理非线性系统，Trujillo等^[46]采用了扩展卡尔曼滤波器(EKF)来估计目标相对位置，但该方法依赖复杂的雅可比矩阵计算。Koide等^[47]使用无迹卡尔曼滤波器(UKF)跟踪目标位置，该方法无需对非线性函数进行线性化，因此不需要计算雅可比矩阵。

基于运动模型的方法对初始检测结果依赖度较高，且对非刚体运动建模能力有限，难以适应目标外观变化。

2.3 基于深度学习的目标跟踪

基于深度学习的目标跟踪方法通常与深度目标检测方法结合使用，能更好地适应目标的外观变化、尺度变化及复杂背景环境。

DeepSORT 因其在目标快速移动、部分遮挡及短暂消失情况下表现出的良好鲁棒性，常与YOLO结合使用，已成为广泛应用的算法之一。Li等^[48]将YOLOv7与DeepSORT结合，成功实现了室内跟随。为克服传统方法中检测器与跟踪器分离的问题，越来越多研究者开始探索端到端的学习框架。Fang等^[49]提出了基于孪生网络的区域提议网络3D-SiamRPN，通过交叉相关模块融合模板与搜索区域特征，有效应对稀疏点云带来的挑战。Transformer及其衍生架构凭借强大的特征表达能力，在目标跟踪任务中展现出独特优势。Chen等^[50]提出的MixFormer视觉跟踪器，突破了传统方法只能跟踪单一类别目标的限制。四足机器人在执行任务过程中常常会经历剧烈的平台抖动，并面临复杂地形带来的视觉干扰，这些因素极易导致传统跟踪算法失效。针对这一问题，Xin等^[51]提出了一种融合点云与RGB视频信息的Transformer架构PVTrack。该方法创新性地设计了动态调整候选区域的机制，显著降低了因平台抖动引发的目标丢失率。在此基础上，该研究团队进一步提出了MHTrack方法^[52]，引入速度-惯性辅助稳定机制和交替训练策略，从算法层面有效缓解了抖动带来的负面影响。

尽管基于深度学习的方法在性能上表现优异，

但其计算资源消耗大、推理速度较慢，可能影响实时性，因而不适合低功耗嵌入式设备。

3 目标重识别技术

目标重识别技术主要用于解决目标在视觉系统中暂时丢失后重新识别的问题，其方法主要分为：

1) 基于特征匹配的重识别。基于特征匹配的重识别即通过提取目标的颜色、纹理、骨架和几何等特征进行匹配进行重识别。Tsai等^[53]提出了一种结合颜色直方图与目标检测框重叠率的重识别策略。为适应环境变化，Algabri等^[54]采用动态更新颜色范围的方法。Jiang等^[55]则采用支持向量机分类器结合增量学习机制，持续更新目标特征以应对目标外观的变化。Rollo等^[56]提出一种阻尼指数移动平均(DEMA)算法，动态更新目标模型与重识别阈值，并引入黑名单管理机制以排除干扰目标。

基于特征匹配的方法在目标长时间遮挡后仍可能实现准确重识别，但易受光照、姿态、视角变化影响，在目标外观发生显著变化时重识别效果下降。

2) 基于运动轨迹预测的重识别。基于运动轨迹预测的方法则是在目标丢失时，利用其历史运动信息预测其可能出现的位置，从而辅助重识别过程。多数研究采用目标跟踪算法输出的轨迹进行预测。Lo等^[57]基于跟踪结果预测目标未来位置，从而缩小搜索范围，提高重识别效率。除了直接使用目标跟踪预测结果，Zhou等^[58]在目标丢失后，通过拟合目标的历史运动轨迹曲线来预测其可能位置，并据此重新定位目标。Algabri等^[59]则采用线性回归模型预测目标位置，有效提高了目标恢复识别的成功率。

基于运动轨迹预测的方法不依赖目标外观特征，适用于目标外观剧烈变化的情况，对短时间内的遮挡或快速移动具有较好适应性。尽管如此，这类方法对初始运动轨迹依赖性强，若初始估计不准可能导致预测偏差。

4 同时定位与建图技术

在自主跟随任务中，四足机器人还需具备在复杂环境中自主导航和安全避障的能力。早期的自主跟随机器人主要依赖惯性测量单元(IMU)与组合导航系统来估计机器人的位姿，并利用预先构建的地图辅助导航与避障工作^[60]。随着机器人计算能力的显著提升，同时定位与建图(SLAM)技术逐渐成为

主流。该技术借助传感器采集的数据,实时精准估计算机器人自身的位置与姿态,并同步构建高精度的环境地图,为后续的智能决策与路径规划提供可靠依据。然而,传统用于自主跟随的 SLAM 算法,Algabri 等^[61]使用的 Gmapping 和 Liu 等^[62]使用的 ORB-SLAM2,在轮式或履带式机器人中表现良好,却难以适应四足机器人的动态运动特性和非结构化环境的干扰。笔者重点总结适用于自主跟随四足机器人的定位与建图技术优化方向,主要包括:

1) 动态适应性。四足机器人在执行小跑、跳跃等步态时,机身易产生剧烈晃动,从而引发传感器数据失真,使传统 SLAM 算法的静态假设失效。Wisth 等^[63]通过因子图融合 IMU 预积分与腿部里程计,有效减少了高频运动对点云匹配的干扰。Ou 等^[64]提出了一种自适应扫描切片方法,通过对激光雷达数据进行分割以校正运动畸变。Yang 等^[65]则根据脚部接触状态动态调整 IMU 噪声参数,提升了位姿估计的鲁棒性。

2) 地形抗干扰。在非结构化环境中,四足机器人在软质地面如草地沙地上易出现足端打滑现象,导致传统里程计失效。Nisticò 等^[66]通过运动学模型检测脚部滑动,触发协方差重置对腿部里程计漂移进行修正;Kang 等^[67]融合触觉传感器数据估计地形刚度,从而修正腿部里程计;Sun 等^[68]通过引入运动学概率模型与动力学概率模型提高对复杂地形的适应性,并结合摩擦锥校正与连杆碰撞校正进一步优化腿部状态估计。

3) 轻量化设计。由于四足机器人通常受限于计算资源,因此需在 SLAM 精度与实时性之间取得平衡。Zhang 等^[69]利用基于 LOAM 算法改进的 FLOAM 算法进行位姿估计并构建周围环境的高程图,该算法降低了计算量,适合实时应用;Zhang 等^[70]采用滑动窗口策略大幅减少优化过程中涉及的变量数量,同时通过边缘化方案控制计算复杂度;Buchanan 等^[71]则部署轻量级 CNN 来估计 IMU 偏置,从而加速硬件运行。

4) 融合目标状态。在跟随任务中,机器人需同时处理动态目标的定位与 SLAM 过程。传统方法通常将 SLAM 与目标定位独立处理,导致目标丢失后难以快速恢复。为此,一些研究尝试将目标跟踪与 SLAM 共享地图信息,以降低遮挡恢复时间并节约计算资源。Lee 等^[72]通过相机实时更新目标质心坐标至 FAST-LIO2 框架,提高了系统响应速度;Chen

等^[73]将 YOLOv4 检测到的目标 3D 位置作为因子图节点,通过实时更新目标位置和机器人位姿,使系统能够快速响应目标运动变化,实现流畅的跟随;Li 等^[74]通过时间同步算法对齐 UWB 目标定位数据与 LiDAR SLAM 数据,使系统在动态环境中仍能保持稳定的跟踪性能。

5 挑战与未来发展

近年来,四足机器人自主跟随智能感知技术取得了显著进展,但要实现高效、稳定、精确的跟随仍面临诸多挑战。这些挑战主要源于四足机器人独特的结构及其工作环境的复杂性。下面结合现有技术水平探讨各技术挑战,并展望未来发展方向。

1) 传感器融合优化。在复杂环境下,四足机器人面临传感器数据时空同步、噪声差异以及冲突处理等问题,影响目标定位性能。未来需开发先进的多传感器融合算法,深入挖掘不同传感器数据间的互补信息,以实现更加精准稳定的数据融合。

2) 复杂环境适应性。尽管一些先进的算法已被应用于增强四足机器人对野外、废墟等非结构化环境的适应性,但面对光照剧烈变化、地形复杂以及遮挡物繁多等条件时,其鲁棒性仍然不足。可研究具备强泛化能力的感知模型,通过数据增强、迁移学习和自适应策略,提高算法在极端环境下的适应性。

3) 实时性与计算资源平衡。受限于体积、功耗和算力,四足机器人难以部署高复杂度的感知算法,导致实时响应能力不足。未来可研究轻量化的感知算法,通过模型压缩、剪枝以及高效的特征提取方法等手段,降低算法的计算复杂度,使其能够在有限的计算资源下高效运行。此外,可探索端到端学习框架的应用,将目标定位、跟踪、环境感知与运动控制等多个环节整合与一个统一模型,实现从原始传感器输入直接输出控制指令的闭环系统。这不仅能减少中间模块的信息损耗,提高系统响应速度,而且能通过大规模真实数据训练获得更强的泛化能力,使四足机器人在有限计算资源下仍能实现高效、稳定的自主跟随。

4) 目标外观与姿态变化。在实际跟随过程中,目标对象的外观可能因穿着改变、携带物品等因素发生显著变化,同时其姿态也可能频繁改变,如弯腰、奔跑、跳跃等。现有识别与跟踪算法对此类变化敏感,容易出现误识别或丢失目标。未来可构建更具鲁棒性的目标表示模型,例如引入姿态不变特

征提取机制、多视角建模或基于动作预测的轨迹推理，提升四足机器人在目标外观与姿态频繁变化情况下的持续跟踪能力。

5) 多目标交互与遮挡。在多人或多物体场景中，目标之间可能发生交叉运动、相互遮挡等情况，造成身份混淆或跟踪中断，影响四足机器人的行为判断与路径规划。未来可尝试建立基于图神经网络或注意力机制的多目标交互建模方法，结合遮挡推理与重识别技术，提升系统在复杂人群环境中的目标区分能力和长期跟踪稳定性。

6) 本体运动干扰抑制。四足机器人在行走或奔跑过程中会产生高频振动和机械抖动，干扰视觉、IMU 等传感器采集的数据，导致感知误差累积，影响目标识别和自身定位的准确性。未来可在硬件层面采用减震装置与滤波器减少物理干扰；在软件层面开发抗干扰感知算法，如基于 IMU 辅助的图像去抖、运动补偿等方法，提升机器人在动态运动状态下的感知稳定性与定位精度。

6 结论

笔者探讨了四足机器人在目标定位、目标跟踪、目标重识别以及定位与建图方面的最新研究进展，并深入分析了其应用特点和面临的挑战。未来，研究者可深耕多传感器融合算法、轻量化计算、多目标处理、抗干扰感知及端到端深度学习等方向，推动自主跟随四足机器人感知技术迈向更高水平，助力其在复杂场景中实现更稳定、高效的跟随，释放更大应用价值，为智能移动机器人领域发展注入新活力。

参考文献：

- [1] BISWAL P, MOHANTY P K. Development of quadruped walking robots: A review[J]. *Ain Shams Engineering*, 2021, 12(2): 2017-2031.
- [2] FAN Y N, PEI Z C, WANG C, et al. A Review of Quadruped Robots: Structure, Control, and Autonomous Motion[J]. *Advanced Intelligent Systems*, 2024, 6(6): 2300783.
- [3] MARC R, KEVIN B, GABRIEL N, et al. BigDog, the Rough-Terrain Quadruped Robot[J]. *IFAC Proceedings Volumes*, 2008, 41(2): 10822-10825.
- [4] BLEDT G, POWELL M J, KATZ B, et al. MIT Cheetah 3: Design and control of a robust, dynamic quadruped robot[C]//2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Madrid: IEEE, 2018: 2245-2252.
- [5] HUTTER M, GEHRING C, JUD D, et al. ANYmal-a highly mobile and dynamic quadrupedal robot[C]//2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Daejeon: IEEE, 2016: 38-44.
- [6] 谢嘉, 桑成松, 王世明, 等. 智能跟随移动机器人的研究与应用前景综述[J]. *制造业自动化*, 2020, 42(10): 49-55.
- [7] ISLAM M J, HONG J, SATTAR J. Person-following by autonomous robots: A categorical overview[J]. *Robotics Research*, 2019, 38(14): 1581-1618.
- [8] YANG S, ZHANG Z X, BOKSER B, et al. Multi-IMU proprioceptive odometry for legged robots[C]//2023 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Detroit: IEEE, 2023: 774-779.
- [9] OH-HARA S, FUJIMORI A. A Leader-follower formation control of mobile robots by position-based visual servo method using fisheye camera[J]. *ROBOMECH*, 2023, 10: 30.
- [10] ALVAREZ-SANTOS V, PARDO X M, IGLESIAS R, et al. Feature analysis for human recognition and discrimination: Application to a person-following behaviour in a mobile robot[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2012, 60(8): 1021-1036.
- [11] ZHANG T L, GUO S K, XIONG X G, et al. Dynamic Object Tracking for Quadruped Manipulator with Spherical Image-Based Approach[C]//2023 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Detroit, MI, USA: IEEE, 2023: 727-734.
- [12] REDHWAN A, MUN-TAEK C. Online Boosting-Based Target Identification among Similar Appearance for Person-Following Robots[J]. *Sensors*, 2022, 22(21): 8422.
- [13] 钟沛成, 骆德渊, 庞明君. 基于深度强化学习的四足机器人跟随策略研究及系统实现[J]. *机械工程学报*, 2023, 59(13): 79-88.
- [14] YE H, ZHAO J, PAN Y, et al. Robot Person Following Under Partial Occlusion[C]//2023 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). London: IEEE, 2023: 7591-7597.
- [15] LIU J H, CHEN X Y, WANG C Q, et al. A person-following method based on monocular camera for quadruped robots[J]. *Biomimetic Intelligence and Robotics*, 2022, 2(3): 100058.
- [16] ZHAO Y, GAO Y, SUN Q, et al. A real-time low-computation cost human-following framework in outdoor environment for legged robots[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2021, 146: 103899.
- [17] LUO S, LIANG Y, LUO Z, et al. Vision-Guided Object Recognition and 6D Pose Estimation System Based on Deep Neural Network for Unmanned Aerial Vehicles towards Intelligent Logistics[J]. *Applied Sciences*, 2022, 13(1): 115.
- [18] YANG T, CHAI H, LI Y B, et al. A Leader-following Method Based on Binocular Stereo Vision For Quadruped Robots[C]//2019 IEEE 9th Annual International Conference on CYBER Technology in Automation,

- Control, and Intelligent Systems (CYBER). Suzhou: IEEE, 2019: 677-682.
- [19] VAN TOAN N, BACH S H, YI S Y. A hierarchical approach for updating targeted person states in human-following mobile robots[J]. *Intelligent Service Robotics*, 2023, 16(3): 287-306.
- [20] ZHANG C Z, LI Z H, CHEN M S, et al. Advanced Multi-Sensor Person-Following System on a Mobile Robot: Design, Construction and Measurements[J]. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 2024, 27(5): 38-44.
- [21] 陈瑾龙, 徐哲壮, 黄平, 等. 基于机器视觉的四足机器人目标识别与跟随系统设计[J]. *实验技术与管理*, 2022, 39(10): 135-139, 167.
- [22] DARAMOUSKAS I, MEIMETIS D, PATRINOPOULOU N, et al. Camera-Based Local and Global Target Detection, Tracking, and Localization Techniques for UAVs[J]. *Machines*, 2023, 11(2): 315.
- [23] YAN Z, DENG W Q, HU B, et al. PLOD-YOLO: Premium Lightweight Object Detection for Autonomous Following Robot[C]//International Conference on Intelligent Computing. Singapore: Springer, 2024: 232-244.
- [24] PAK E S, KIM B H, LEE K S, et al. Study on the Near-Distance Object-Following Performance of a 4WD Crop Transport Robot: Application of 2D LiDAR and Particle Filter[J]. *Applied Sciences*, 2024, 15(1): 317.
- [25] 另佳. 基于多线激光雷达的四足机器人室外自主跟随人员方法研究[D]. 济南: 山东大学, 2020.
- [26] YAO H C, DAI H D, ZHAO E H, et al. Laser-Based Side-by-Side Following for Human-Following Robots[C]//2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Prague: IEEE, 2021: 2651-2656.
- [27] TOAN N V, DO HOANG M, KHOI P B, et al. The human-following strategy for mobile robots in mixed environments[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2023, 160: 104317.
- [28] GONG L X, CAI Y F. Human Following for Outdoor Mobile Robots Based on Point-Cloud's Appearance Model[J]. *Electronics*, 2021, 30(6): 1087-1095.
- [29] CHEN X Y, LIU J H, WU J, et al. LoPF: An Online LiDAR-Only Person-Following Framework[J]. *Instrumentation and Measurement*, 2022, 71: 1-13.
- [30] PARK J, JO H J, MOON B C. Development of a human-following scheme using point-voxel RCNN-based 3D human leg detection for the robust human-following of mobile robots in cluttered environments[J]. *Advanced Robotic Systems*, 2024, 21(5): 1-9.
- [31] FENG T, YU Y, WU L, et al. A Human-Tracking Robot Using Ultra Wideband Technology[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 42541-42550.
- [32] DANG C V, AHN H, KIM J W, et al. Collision-Free Navigation in Human-Following Task Using a Cognitive Robotic System on Differential Drive Vehicles[J]. *Cognitive and Developmental Systems*, 2023, 15(1): 78-87.
- [33] 刘关迪, 赵璐. 基于 UWB 技术的室内智能跟随系统的实现与优化[J]. *计算机应用与软件*, 2020, 37(12): 95-100.
- [34] LI Z, LI B, LIANG Q X, et al. A quadruped robot obstacle avoidance and personnel following strategy based on ultra-wideband and three-dimensional laser radar[J]. *Advanced Robotic Systems*, 2022, 19(4): 1-16.
- [35] ZHU Y P, WANG T, ZHU S Q. A novel tracking system for human following robots with fusion of MMW radar and monocular vision[J]. *Industrial Robot*, 2022, 49(1): 120-131.
- [36] ZHANG J, GUO J, CHAI H, et al. A Day/Night Leader-Following Method Based on Adaptive Federated Filter for Quadruped Robots[J]. *Biomimetics*, 2023, 8: 20.
- [37] SARMENTO J, SANTOS F N D, VALENTE A. Fusion of Time-of-Flight Based Sensors with Monocular Cameras for a Robotic Person Follower[J]. *Intelligent & Robotic Systems*, 2024, 110(1): 1-14.
- [38] JANOUSEK P, SLANINA Z, WALENDZIUK W. Target-following Robotic Platform Based on UWB Localization and Depth Camera[J]. *IFAC-Papers On Line*, 2024, 58(9): 247-252.
- [39] 刘凯. 仿生四足机器人融合多传感器跟随人体移动的研究与实现[D]. 北京: 北京交通大学, 2023.
- [40] CHENG X D, JIA Y D, SU J Y, et al. Person-following for Telepresence Robots Using Web Cameras[C]//2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Macau: IEEE, 2019: 2096-2101.
- [41] 杨彤. 基于立体视觉及组合导航信息融合的四足机器人领航员跟随方法研究[D]. 济南: 山东大学, 2020.
- [42] PANG L, CAO Z Q, YU J Z, et al. A Visual Leader-Following Approach With a T-D-R Framework for Quadruped Robots[J]. *Man and Cybernetics*, 2021, 51(4): 2342-2354.
- [43] JIANG Z Y, ZHANG H, XU J X, et al. Real-Time Target Detection and Tracking System Based on Stereo Camera for Quadruped Robots[C]//第 31 届中国控制与决策会议. 南昌: IEEE, 2019: 272-277.
- [44] HAN D Y, PENG Y G. Human-Following of Mobile Robots Based on Object Tracking and Depth Vision[C]//2020 3rd International Conference on Mechatronics, Robotics and Automation (ICMRA). Shanghai: IEEE, 2020: 105-109.
- [45] PANG L, CAO Z Q, YU J Z, et al. A Robust Visual Person-Following Approach for Mobile Robots in Disturbing Environments[J]. *Systems*, 2020, 14(2): 2965-2968.
- [46] TRUJILLO J, MUNGUÍA R, URZUA S, et al. Monocular Visual SLAM Based on a Cooperative UAV-Target System[J]. *Sensors*, 2020, 20(12): 3531.
- [47] KOIDE K, MIURA J, MENEGATTI E. Monocular person tracking and identification with on-line deep feature

- selection for person following robots[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2020, 124: 103348.
- [48] LI Y, ZHAO J, LUO X. SLAM-based Person Following Robot with Online Trajectory Recovery Strategy[C]//2023 35th Chinese Control and Decision Conference (CCDC). Yichang: IEEE, 2023: 4645–4650.
- [49] FANG Z, ZHOU S F, CUI Y B, et al. 3D-SiamRPN: An End-to-End Learning Method for Real-Time 3D Single Object Tracking Using Raw Point Cloud[J]. *Sensors*, 2021, 21(4): 4995–5011.
- [50] CHEN G R, FAN Q H, HOU X N. A Framework for Automatic Following Based on Visual Tracking for Quadruped Robots[C]//2024 8th International Conference on Robotics, Control and Automation (ICRCA). Shanghai: IEEE, 2024: 6–12.
- [51] XIN S, ZHANG Z, WANG M M, et al. Multi-modal 3D Human Tracking for Robots in Complex Environment with Siamese Point-Video Transformer[C]//2024 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Yokohama: IEEE, 2024: 337–344.
- [52] XIN S, LIU L, KANG X, et al. Beyond Traditional Driving Scenes: A Robotic-Centric Paradigm for 2D+3D Human Tracking Using Siamese Transformer Network[C]//2024 7th International Symposium on Autonomous Systems (ISAS). Chongqing: IEEE, 2024: 1–6.
- [53] TSAI T, YAO C. A robust tracking algorithm for a human-following mobile robot[J]. *IET Image Processing*, 2021, 15(3): 786–796.
- [54] ALGABRI R, CHOI M T. Robust Person Following Under Severe Indoor Illumination Changes for Mobile Robots: Online Color-Based Identification Update[C]//2021 21st International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS). Jeju: IEEE, 2021: 1000–1005.
- [55] JIANG M X, LI R, LIU Q S, et al. High speed long-term visual object tracking algorithm for real robot systems[J]. *Neuro computing*, 2021, 434: 268–284.
- [56] ROLLO F, ZUNINO A, TSAGARAKIS N, et al. Continuous Adaptation in Person Re-identification for Robotic Assistance[C]//2024 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Yokohama: IEEE, 2024: 425–431.
- [57] LO L Y, YIU C H, TANG Y, et al. Dynamic Object Tracking on Autonomous UAV System for Surveillance Applications[J]. *Sensors*, 2021, 21(23): 7888.
- [58] ZHOU Z Q, FU Y, WU W. Human-following task without a prior map[J]. *The Industrial Robot*, 2024, 51(6): 960–972.
- [59] 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): 4165.
- [60] CHO K, BAEG S H, PARK S. 3D pose and target position estimation for a quadruped walking robot[C]//2013 10th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI). Jeju: IEEE, 2013: 466–467.
- [61] ALGABRI R, CHOI M T. Deep-Learning-Based Indoor Human Following of Mobile Robot Using Color Feature[J]. *Sensors*, 2020, 20(9): 2699.
- [62] LIU Y, XU M, JIANG G, et al. Target localization in local dense mapping using RGBD SLAM and object detection[J]. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 2022, 34(4): e6655.
- [63] WISTH D, CAMURRI M, FALLON M. VILENS: Visual, Inertial, Lidar, and Leg Odometry for All-Terrain Legged Robots[J]. *Robotics*, 2023, 39(1): 309–326.
- [64] OU G, LI D, LI H. Leg-KILO: Robust kinematic-inertial-lidar odometry for dynamic legged robots[J]. *Robotics and Automation Letters*, 2024, 9(10): 8194–8201.
- [65] YANG S, ZHANG Z X, FU Z Y, et al. Cerberus: Low-Drift Visual-Inertial-Leg Odometry For Agile Locomotion[C]//2023 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). London: IEEE, 2023: 4193–4199.
- [66] NISTICÒ Y, FAHMI S, PALLOTTINO L, et al. On Slip Detection for Quadruped Robots[J]. *Sensors*, 2022, 22(8): 2967.
- [67] KANG P, MU X R, XU W F, et al. State estimation and traversability map construction method of a quadruped robot on soft uneven terrain[J]. *Field Robotics*, 2023, 40(5): 1130–1150.
- [68] SUN J Y, ZHOU L L, GENG B H, et al. Leg State Estimation for Quadruped Robot by Using Probabilistic Model With Proprioceptive Feedback[J]. *Mechatronics*, 2024: 1–12.
- [69] ZHANG Z, YAN J Q, KONG X, et al. Efficient Motion Planning Based on Kinodynamic Model for Quadruped Robots Following Persons in Confined Spaces[J]. *Mechatronics*, 2021, 26(4): 1997–2006.
- [70] ZHANG C, YANG Z, FANG Q H, et al. FRL-SLAM: A Fast, Robust and Lightweight SLAM System for Quadruped Robot Navigation[C]//2021 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). Sanya: IEEE, 2021: 1165–1170.
- [71] BUCHANAN R, AGRAWAL V, CAMURRI M, et al. Deep IMU Bias Inference for Robust Visual-Inertial Odometry With Factor Graphs[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2023, 8(1): 41–48.
- [72] LEE E M, JEON J, MYUNG H. TROT-Q: Traversability and Obstacle Aware Target Tracking System for Quadruped Robots[C]//2022 13th Asian Control Conference (ASCC). Jeju: IEEE, 2022: 2480–2484.
- [73] CHEN C, MA Y, LV J, et al. OL-SLAM: A Robust and Versatile System of Object Localization and SLAM[J]. *Sensors*, 2023, 23(2): 801.
- [74] LI Y Y, ZOU Y, ZHANG X D, et al. LUGOT: LiDAR and UWB Fusion for Global Given Object Tracking Under Mobile Anchors[J]. *Sensors*, 2025, 25(3): 4882–4896.