

融合视觉导航的两轮机器人 FOC 电机自适应控制策略

张军胜 梁潇文 张福龙 张林

陕西铁路工程职业技术学院，陕西渭南，714000；

摘要：两轮机器人凭借高机动性优势在多个领域广泛应用，其运动控制精度与导航稳定性是核心技术瓶颈。视觉导航因信息获取全面的特点成为主流导航方案，磁场定向控制（FOC）则是电机高精度驱动的关键技术，而融合二者的自适应控制策略可有效应对负载波动、参数摄动等复杂干扰。本文系统综述融合视觉导航的两轮机器人 FOC 电机自适应控制领域的研究进展：首先梳理两轮机器人视觉导航技术的发展现状，分析不同视觉定位方案的优劣；其次总结 FOC 电机控制技术及自适应控制算法的研究成果，探讨各类算法的适配场景；最后剖析视觉导航与电机自适应控制的融合机制，指出当前研究存在的问题及未来发展方向，为该领域的后续研究提供参考。

关键词：两轮机器人；视觉导航；磁场定向控制；自适应控制

DOI: 10.69979/3060-8767.25.12.080

引言

两轮机器人因结构紧凑、运动灵活，在多领域广泛应用。复杂场景对其导航精度与运动控制稳定性要求更高。视觉导航技术是主流，但复杂环境易使位姿检测有误差；两轮机器人双电机驱动受外部干扰，传统 FOC 策略用固定参数 PI 调节器，难精准跟踪电机转速，影响导航与运动性能。研究融合视觉导航的两轮机器人 FOC 电机自适应控制策略，通过视觉导航提供位姿反馈，结合自适应算法调整参数，对提升运动控制精度与导航稳定性有重要意义。在机器人视觉导航领域，国内外学者做了大量研究，如 Mur - Artal 提出 ORB - SLAM 算法，国内 Zhang 等提出融合 IMU 的方案，但现有技术未结合电机控制协同优化。在电机 FOC 控制领域，传统 FOC 策略应用广泛，但适应性差，学者提出多种自适应方案，如 Wang 的模糊控制策略、Li 的神经网络策略，但都有不足。并且，现有研究中视觉导航与电机控制独立设计，无协同机制，难满足复杂场景需求。

1 两轮机器人视觉导航技术研究现状

1.1 单目视觉导航技术

单目视觉导航因设备成本低、结构简单，是两轮机器人常用导航方案，核心难点是平衡尺度不确定性与定位精度。早期依赖人工标记点定位，局限性大，随着 SLAM 技术发展，基于自然特征的单目 SLAM 成研究主流。SIFT、SURF 算法虽有尺度与旋转不变性，但计算复杂度高，难满足实时导航需求。Mur - Artal 等提出的 ORB - SLAM 算法，结合改进的 FAST 角点检测与 BRIEF 描述

子，保证匹配精度同时提升了计算效率，推动了工程应用。针对尺度不确定性问题，Zhang 等提出融合惯性测量单元（IMU）的方案，用卡尔曼滤波融合信息提升位姿检测精度；Li 等提出基于地面纹理特征的尺度估计方法，无需额外传感器恢复尺度、降低成本。单目视觉导航设备轻便、成本低，适用于室内低动态场景，但在特征稀少或快速运动场景下，定位精度易受影响，尺度问题有待优化。

1.2 双目视觉导航技术

双目视觉导航通过双相机模拟人眼，利用视差计算三维定位，可解决单目尺度不确定性问题，定位精度高。核心技术有相机标定、立体匹配与三维重建，立体匹配算法性能决定导航性能。早期 SAD、SSD 等基于区域匹配，计算效率高但精度不足，深度学习发展后，基于 CNN 的算法成热点。He 等的 PSMNet 算法在复杂环境下匹配精度高；Chen 等的 GCNet 算法提升了弱纹理区域匹配性能。Wang 等设计的基于双目 SLAM 的导航系统，优化算法实现室内高精度定位。但双目视觉导航设备体积大、计算复杂、受光照影响，限制其在小型两轮机器人应用。

2 FOC 电机控制及自适应控制策略研究现状

2.1 FOC 电机控制技术基础

直流无刷电机（BLDC）因效率高、转矩大、寿命长等优势，成为两轮机器人的主流驱动元件，而磁场定向控制（FOC）是实现 BLDC 电机高精度控制的核心技术。FOC 的核心思想是通过克拉克变换与帕克变换，将三相

定子电流转换到两相旋转坐标系（d-q 坐标系）下，实现磁链与转矩的解耦控制，其中 d 轴控制磁链、q 轴控制转矩，当 d 轴电流为零时可实现最大转矩/电流控制，显著提升电机驱动效率。

早期 FOC 控制采用模拟电路实现，控制精度低、灵活性差；随着微处理器技术的发展，数字式 FOC 控制成为主流，通过单片机或 DSP 实现变换算法与调节器设计，显著提升了控制精度与灵活性。目前，FOC 控制技术已在工业自动化、机器人等领域广泛应用，但传统 FOC 控制采用固定参数 PI 调节器，难以适应两轮机器人运行过程中的负载波动、参数老化、路面摩擦力变化等外部干扰，易导致转速跟踪精度下降，影响机器人运动稳定性。

2.2 自适应控制策略研究进展

模糊自适应控制基于模糊数学理论，模拟人类专家控制经验设计模糊规则，实现控制参数动态调整，无需精确电机数学模型，适用于非线性、不确定性系统。Wang 等提出基于模糊控制的 FOC 参数自适应调整策略，以电机转速误差与误差变化率为输入，修正 PI 调节器参数，改善转速跟踪性能，但模糊规则依赖人工经验，通用性差、控制精度易受影响。Li 等提出基于遗传算法优化的模糊自适应 FOC 控制策略，自动优化模糊规则与隶属度函数，减少人工经验依赖，但遗传算法优化过程复杂、实时性差。

神经网络可通过学习逼近电机系统不确定性与外部干扰，实现自适应控制。Zhang 等提出基于 BP 神经网络的自适应 FOC 控制策略，调整 PI 调节器参数，提升电机控制鲁棒性，但 BP 神经网络收敛速度慢、易陷入局部最优。Chen 等提出基于 RBF 神经网络的自适应 FOC 控制策略，可快速逼近电机系统不确定性，提升控制实时性，但计算复杂度高、对微处理器要求高。此外，Wang 等提出基于深度学习的电机干扰预测模型，预测外部干扰、调整控制参数，提升控制精度，但模型训练复杂、需大量样本数据。

模型参考自适应控制以理想系统模型为参考，通过自适应律调整可调系统参数，使输出跟踪参考模型输出，理论基础扎实、稳定性可保证。Li 等基于李雅普诺夫稳定性理论设计 MRAC 自适应律，调整 FOC 电机控制的 PI 参数，补偿电机参数摄动影响，但传统 MRAC 方案自适应律设计复杂、鲁棒性待提升。学者们通过多源信息融合优化 MRAC 方案，Zhang 等提出融合转速与电流反馈的

MRAC 自适应 FOC 控制策略，估计外部干扰、优化自适应律设计，提升系统抗干扰能力，该方案适用于两轮机器人等多干扰场景下，观测器设计增加系统复杂度。滑模自适应控制基于滑模变结构控制理论，设计滑模面与切换控制律使系统状态沿滑模面运动，抗干扰能力强、响应速度快。Wang 等提出滑模自适应 FOC 控制策略，用滑模观测器估计电机转子位置与转速，动态调整控制律，抑制了负载波动与参数摄动影响；但传统滑模控制有抖振问题，影响电机运行平稳性。为抑制抖振，学者提出多种改进方案：Chen 等用饱和函数替代传统切换函数，降低抖振幅度但牺牲部分控制精度；Li 等提出基于模糊逻辑的滑模自适应控制策略，通过模糊规则动态调整滑模面参数，抑制抖振且保证控制精度，适用于对运动平稳性要求高的两轮机器人场景，但模糊规则设计依赖经验。

3 视觉导航与 FOC 电机自适应控制融合机制研究

3.1 松散耦合融合机制

松散耦合融合机制中，视觉导航模块与电机自适应控制模块相互独立工作，视觉导航模块输出位姿误差信息，电机控制模块根据位姿误差生成转速指令，自适应算法仅根据转速误差调整控制参数，不直接利用视觉导航信息优化自适应律。该融合机制的优点是结构简单、开发难度低，适用于对实时性要求较高的简单场景。

早期两轮机器人融合系统多采用松散耦合机制：Zhang 等设计的融合系统中，视觉导航模块通过 ORB-SLAM 算法获取位姿信息，电机控制模块采用模糊自适应 FOC 控制策略，根据位姿误差生成转速指令，自适应算法仅根据转速误差调整模糊规则；该系统结构简单，实时性较好，但由于未利用视觉导航信息优化自适应律，在复杂干扰场景下控制精度易受影响。松散耦合融合机制的局限性在于导航与控制的协同性较差，难以充分发挥视觉导航的优势，适用于低动态、低精度需求的场景。

3.2 紧密耦合融合机制

紧密耦合融合机制中，视觉导航模块与电机自适应控制模块通过共享信息交互，视觉导航信息不仅用于生成转速指令，还直接参与电机自适应控制参数的调整，提升导航与控制的协同性。该融合机制的核心是设计信息融合策略，将位姿误差、转速误差等多源信息融合，优化自适应律设计。

Li 等提出的紧密耦合融合方案中,视觉导航模块输出位姿误差与位姿误差变化率,结合电机转速误差,通过卡尔曼滤波实现多源信息融合,融合结果用于优化 MRAC 自适应律的学习速率;当位姿误差较大时,增大学习速率加快控制参数调整,当位姿误差较小时,减小学习速率保证控制稳定性,该方案显著提升了机器人的轨迹跟踪精度。Wang 等设计的融合系统中,利用视觉导航获取的路面纹理信息,预测路面摩擦力变化,提前调整滑模自适应控制的滑模面参数,有效抑制了路面干扰带来的影响;该方案的优势在于实现了干扰的提前预测与补偿,提升了系统的抗干扰能力,但路面纹理信息的提取精度易受光照条件影响。

3.3 深度耦合融合机制

深度耦合融合机制通过统一的优化目标函数,将视觉导航的位姿估计与电机自适应控制的参数调整结合为一个整体,实现多目标协同优化,是当前融合技术的研究热点。该融合机制需要建立导航与控制的联合数学模型,开发难度较高,但融合性能显著优于松散耦合与紧密耦合机制。

Chen 等提出基于强化学习的深度耦合融合方案,以机器人轨迹跟踪精度与电机运行效率为联合优化目标,通过强化学习智能体同时优化视觉导航的特征提取策略与电机自适应控制参数;该方案无需建立精确的数学模型,可自适应复杂环境,但强化学习智能体的训练过程复杂,需要大量的训练样本与计算资源。Zhang 等设计的深度耦合融合系统中,建立了视觉导航位姿误差与电机控制参数的联合优化模型,通过粒子群优化算法求解最优控制参数,实现了导航与控制的全局最优;该方案控制精度较高,但粒子群优化算法的计算复杂度较高,实时性有待提升。

4 当前研究存在的问题与未来发展方向

尽管融合视觉导航的两轮机器人FOC电机自适应控制技术已取得显著进展,但实际应用中仍存在诸多问题,主要如下:一是视觉导航鲁棒性不足。现有视觉导航技术在极端环境下定位精度易下降或失效,还易受障碍物遮挡影响,单目视觉尺度不确定性问题在快速运动场景未彻底解决。二是自适应控制算法实时性与精度难以平衡。部分算法计算复杂度高,难以满足实时控制需求;部分算法控制精度不足或有抖振问题。三是融合机制协

同性有待提升。现有融合方案协同性差或信息融合策略简单,未考虑动态适配性,且多未考虑动态障碍物规避与电机控制协同,复杂动态场景适应性不足。四是工程化应用存在瓶颈。现有研究未充分考虑实际复杂干扰,硬件集成、功耗优化等问题限制技术推广。

针对当前问题,结合技术发展趋势,未来可从以下方面深入研究:一是开展多模态视觉导航技术研究。融合多模态传感器提升导航鲁棒性,结合深度学习减少定位误差,引入其他传感器解决尺度不确定性与遮挡问题。二是进行高效自适应控制算法优化。基于轻量化深度学习开发低复杂度算法,结合模型预测控制实现前瞻性控制,引入智能优化算法自动优化参数。三是设计智能融合机制。基于智能技术开发动态自适应融合策略,根据环境变化。根据机器人运动状态自动切换融合模式(松散耦合、紧密耦合、深度耦合),实现导航与控制动态协同优化;建立导航、控制与避障联合优化模型,实现多目标协同控制,提升复杂动态场景适应性。开展工程化技术研发,进行视觉导航设备与电机控制模块一体化硬件设计,优化系统功耗与体积;建立实际应用场景干扰模型,开发抗干扰强的控制算法;通过大量实地实验验证技术可靠性与稳定性,推动工程化推广。

5 结论

融合视觉导航的两轮机器人FOC电机自适应控制技术是提升机器人运动性能的核心方向,本文系统综述了该领域的研究进展。在视觉导航技术方面,单目、双目、深度相机视觉导航各有优劣,需根据应用场景选择适配方案;在 FOC 电机自适应控制方面,模糊自适应、神经网络自适应、MRAC、滑模自适应等算法各具特点,需平衡控制精度、实时性与鲁棒性;在融合机制方面,松散耦合、紧密耦合、深度耦合机制的协同性逐步提升,但工程化应用仍面临挑战。

参考文献

- [1] 刘鑫东. 基于 FOC 的永磁同步电机全速域无位置传感器控制策略[D]. 重庆理工大学[2025-12-10].
- [2] 李万超. 面向效率优化的车用永磁同步电机控制策略研究[D]. 昆明理工大学, 2022.

作者简介: 张军胜,男、陕西渭南人,硕士研究生,工程师,主要研究方向:电气控制,机械设计。