

先进机器人中的动力学与控制专刊序*

方虹斌^{1†} 彭海军²

(1. 复旦大学 智能机器人研究院, 上海 200433)

(2. 大连理工大学 工程力学系, 工业装备结构分析优化与 CAE 软件全国重点实验室, 大连 116024)

摘要 围绕柔性机械臂动力学建模方法、空间机器人捕获动力学、多智能体控制、仿生跳跃机器人设计与分析等研究主题, 本专刊介绍了先进机器人动力学与控制领域的一些最新研究成果。

关键词 柔性机器人, 仿生机器人, 多智能体系统, 动力学建模, 智能控制

中图分类号: TP13

文献标志码: A

Preface to the Special Issue: Dynamics and Control of Advanced Robots*

Fang Hongbin^{1†} Peng Haijun²

(1. Institute of AI and Robotics, Fudan University, Shanghai 200433, China)

(2. Dalian University of Technology, Department of Engineering Mechanics, State Key Laboratory of Structural Analysis, Optimization and CAE Software for Industrial Equipment, Dalian 116081, China)

Abstract This special issue presents some of the latest research findings in the field of advanced robot dynamics and control, focusing on research topics such as dynamic modeling methods for flexible robotic arms, capturing dynamics of space robots, control of multi-agent systems, and design and analysis of bio-inspired jumping robots.

Key words soft robot, bioinspired robot, multi-agent system, dynamic modeling, intelligent control

序言

随着科技的不断发展, 机器人已经成为现代社会中不可或缺的一部分。机器人的广泛应用涵盖了各个领域, 包括工业制造、医疗保健、军事防务、服务业等等。在机器人的研究与开发过程中, 动力学与控制作为重要的技术领域, 扮演着至关重要的角色。本期《动力学与控制学报》特别推出“先进机器人动力学与控制”专刊, 旨在探讨机器人动力学与

控制领域的最新进展和未来发展趋势。

机器人的动力学研究对于所有类型机器人的发展和实际应用具有重要意义, 是机器人性能的重要评价指标。动力学不仅关乎机器人的运动学特性, 更是决定了机器人在实际任务中的表现和效率。通过深入研究机器人的动力学特性, 我们能够更好地理解 and 优化机器人的运动学性能, 从而提高机器人的工作效率和精度。

机器人的动力学与控制是机器人研究的难点,

2023-12-16 收到第 1 稿, 2023-12-22 收到修改稿。

* 国家自然科学基金项目 (11932015, 12272096) 和上海市基础研究特区计划项目 (21TQ1400100-22TQ009), National Natural Science Foundation of China (11932015, 12272096) and the Shanghai Pilot Program for Basic Research-Fudan University (21TQ1400100-22TQ009).

† 通信作者 E-mail: fanghongbin@fudan.edu.cn

主要体现在动力学建模难,参数辨识难,精准智能控制难。机器人系统通常由复杂的机械结构、多变的工作环境以及各种传感器和执行器组成,这使得机器人的动力学建模变得异常复杂和困难。此外,机器人的参数通常难以准确辨识,给控制算法的设计和实现带来了挑战。而要实现机器人的精准控制,则需要克服非线性、时变等多种复杂因素的影响,这也是机器人动力学与控制领域的重要研究内容。

先进机器人日益呈现出柔性化、可重构、微型化、仿生化、群体化的趋势,机器人的动力学与控制研究面临更多挑战和机遇,成为学术界的前沿领域,也是力学、材料、机械、自动化、人工智能等学科的交叉领域。随着科技的进步和社会需求的不断变化,未来机器人将更加智能化、灵活化和人性化,这就需要我们不断地推进机器人动力学与控制技术的研究与创新,以应对日益复杂的应用场景和挑战。

本期专刊汇集了国内优秀学者在机器人动力学与控制领域的最新研究成果和理论探索,共包括9篇论文(含3篇综述论文),涵盖了机器人结构与驱动设计、机器人动力学建模、数字孪生技术、控制算法设计、实验验证等方面的研究内容。相信这些研究成果将为推动机器人技术的发展,促进机器人在各个领域的应用和推广,做出积极的贡献。我们期待着与广大读者分享这些精彩的研究成果,并为机器人技术的发展贡献我们的力量。

复旦大学方虹斌等^[1]的《柔性机械臂动力学建模研究进展》综述了柔性机械臂的动力学建模领域的最新进展,全面回顾了柔性机械臂在运动学建模和动力学建模方面的研究成果。文章总结了多种运动学建模方法,包括曲率法、伪刚体运动学方法、基于 Cosserat 杆的建模方法、结构几何分析方法、Denavit-Hartenberg (D-H)法,以及数据驱动和机器学习方法等,并对集中参数系统法、假设模态法、有限元法等动力学建模方法进行了详细的综述。文章还介绍了柔性机械臂动力学研究主要内容,即基于动力学模型的大变形预测、振动预测和振动控制、运动规划和高精度位姿控制等。文章最后对未来研究方向,特别是在降维、求解非线性动力学问题、宽频振动控制等挑战性问题进行了展望。

上海交通大学蔡国平等^[2]的《空间机器人捕获

动力学与控制》深入探讨了空间机器人在轨捕获目标的动力学和控制问题,文章系统地介绍了国际上主要的空间机器人计划,并详尽地综述了捕获过程中的三个关键阶段:捕获前的逼近与对接策略、捕获过程中的动态响应与稳定性控制,以及捕获后的状态维持与任务执行。这些研究内容对于解决太空碎片清理或在轨维修航天器的挑战至关重要。

西安交通大学吴业辉等^[3]的《微小型跳跃机器人:仿生原理,设计方法与驱动技术》深入探讨了微小型跳跃机器人的设计和动力学特征,研究侧重于模拟生物跳跃的四个阶段:准备、起跳、腾空和着陆,揭示了跳跃机器人在这些阶段中的动力学特征和技术要点,强调了储能和释放结构的集成对于跳跃方向改变的重要性,并讨论了闩锁结构在控制能量释放过程中的关键作用。在着陆缓冲设计方面,通过应用空气动力学、结构缓冲等方法以降低着陆冲击。此外,研究还包括了跳跃机器人姿态恢复和起跳角度调整技术。文章归纳了当前研究的挑战和跳跃机器人未来的发展趋势及潜在价值。

北京航空航天大学柯恺宸等^[4]的《基于强化学习的机器人多接触交互任务控制》总结了运用强化学习提升机器人在复杂多接触交互任务中的智能控制能力。文章介绍了强化学习在机器人技术中的应用,尤其是在执行开门、装配等多接触任务方面的优势。文章还指出,这些任务要求机器人精确控制动作和交互力量,强化学习通过智能体不断与环境互动来优化控制策略,提高任务执行的效率和安全性。

大连理工大学王智文等^[5]的《基于动力学的张拉整体柔性臂数字孪生系统》探索了连续型机器人的安全性和交互性提升。文章建立了张拉整体柔性臂数字孪生系统,利用位置坐标有限元方法构建了动力学模型。研究还结合虚拟引擎和数字孪生五维模型,实现了实验室场景和设备模型的数字孪生,并进行了轻量化处理。通过碰撞检测和危险预警,实现了物理柔性臂与虚拟孪生柔性臂间的交互控制,为连续型机器人的实时状态监控和人机交互提供了有效手段。

北京航空航天大学安宁波等^[6]的《无人机集群的微分平坦性与编队控制研究》针对无人机集群编队控制问题,提出了一种结合分散式规划与分布式控制的协调设计方法。研究基于微分平坦性理论,

通过微分平坦映射将运动指令转换为无人机的期望状态和控制输入,并设计了基于局部误差反馈的分布式编队控制器,以实时生成期望编队轨迹和构型.研究还给出了稳定性分析和参数选取条件,最后通过仿真验证了在未知环境下的运动控制效果.

北京理工大学牛岩等^[7]的《基于刚柔耦合模型的仿生鸭机器人运动分析》通过 Hypermesh 和 Adams 软件建立了仿生鸭机器人的刚柔耦合模型,计算了小腿部分的动态受力和形变情况,并分析了影响蹼足运动的结构变形和关节摩擦因素.该仿生机器人包括大腿、小腿和足蹼,其中小腿对推进机构性能至关重要.刚柔耦合方法在计算效率和精度上优于传统方法,有助于更接近实际的分析结果.

复旦大学黄斌等^[8]的《基于改进快速行进平方法的多移动机器人聚集路径规划与控制》提出了一种基于分段函数改进速度图的路径规划策略,有效减少了路径回溯时的冗余,同时保证了安全性.研究考虑了多种任务需求,如总能耗最小化和聚集队形约束,以确定最优聚集点和相应的路径规划.此外,利用动力学模型和模型预测控制策略,进行了仿真实验,验证了改进策略在实际应用中的有效性,确保了机器人在复杂环境中的高效聚集和轨迹跟踪精度.

同济大学闵熔祺等^[9]的《多移动机械臂系统动力学建模以及稳定性分析》针对工业应用中单个移动机械臂的限制,开发了一套多移动机械臂系统的动力学模型.该研究通过改良的 D-H 方法建立了单臂模型,并通过仿真验证了其准确性.随后,研究者联立了多机械臂的动力学方程,形成了完整的系统微分方程组,并成功设计并验证了稳定性控制律.

先进机器人动力学与控制领域的研究成果日益丰富,本期专刊呈现了来自多个学术机构的 9 篇高水平论文,涉及机器人动力学与控制领域的多个关键主题.这些论文涵盖了柔性机械臂、空间机器人、微型跳跃机器人、强化学习控制、连续型机器人、无人机集群、仿生机器人等方面的研究问题,为该领域的深入探索提供了有益的启示和理论支持.然而,受篇幅所限,本期专刊所收录的论文还远不够全面,无法覆盖机器人领域所有的研究方向和新兴技术.此外,一些论文在实验验证和应用案例方

面的描述不够充分,缺乏对研究成果实际应用的深入讨论.

本期专刊为机器人动力学与控制领域的研究者提供了宝贵的研究成果和理论参考,但同时也提醒我们仍需不断努力,进一步完善研究内容和方法,以应对日益复杂和多样化的机器人应用需求,推动该领域的持续发展和进步.

参考文献

- [1] 方虹斌,郑立,张琦炜,等.柔性机械臂动力学建模研究进展 [J]. 动力学与控制学报, 2023, 21(12): 1—17.
FANG H B, ZHENG L, ZHANG Q W, et al. Research progress on dynamics modeling of flexible robotic arms: a review [J]. Journal of Dynamics and Control, 2023, 21(12): 1—17. (in Chinese)
- [2] 蔡国平,刘晓峰,刘元卿.空间机器人捕获动力学与控制 [J]. 动力学与控制学报, 2023, 21(12): 18—32.
CAI G P, LIU X F, LIU Y Q. Capturing dynamics and control of space robots [J]. Journal of Dynamics and Control, 2023, 21(12): 18—32. (in Chinese)
- [3] 吴业辉,刘梦凡,白瑞玉,等.微小型跳跃机器人:仿生原理,设计方法与驱动技术 [J]. 动力学与控制学报, 2023, 21(12): 33—48.
WU Y H, LIU M F, BAI R Y, et al. A review of small-scale jumping robots: bio-mimetic mechanism, mechanical design and actuation [J]. Journal of Dynamics and Control, 2023, 21(12): 49—65. (in Chinese)
- [4] 柯恺宸,金士博,高博扬,等.基于强化学习的机器人多接触交互任务控制 [J]. 动力学与控制学报, 2023, 21(12): 49—65.
Ke K C, Jin S B, Gao B Y, et al. A survey of robot intelligent control method in contact-rich tasks [J]. Journal of Dynamics and Control, 2023, 21(12): 49—65. (in Chinese)
- [5] 王智文,杨浩,李飞,等.基于动力学的张拉整体柔性臂数字孪生系统 [J]. 动力学与控制学报, 2023, 21(12): 66—74.
WANG Z W, YANG H, LI F, et al. Dynamic based digital twin system for tensegrity flexible manipulator [J]. Journal of Dynamics and Control, 2023, 21(12): 66—74. (in Chinese)
- [6] 安宁波,王琦少,赵小川,等.无人机集群的微分平坦

- 性与编队控制研究 [J]. 动力学与控制学报, 2023, 21(12): 75–84.
- AN N B, WANG Q S, ZHAO X C, et al. Differential flatness and formation control of unmanned aerial vehicle swarm [J]. Journal of Dynamics and Control, 2023, 21(12): 75–84. (in Chinese)
- [7] 牛岩, 石立伟, 郭书祥. 基于刚柔耦合模型的仿生鸭机器人运动分析 [J]. 动力学与控制学报, 2023, 21(12): 85–91.
- NIU Y, SHI L W, GUO S X, et al. Kinematics analysis of duck-inspired robot based on rigid-flexible coupling model [J]. Journal of Dynamics and Control, 2023, 21(12): 85–91. (in Chinese)
- [8] 黄斌, 俞凯文, 周柏李, 等. 基于改进快速行进平方法的多移动机器人聚集路径规划与控制 [J]. 动力学与控制学报, 2023, 21(12): 92–102.
- HUANG B, YU K W, ZHOU B L, et al. Gathering path planning and control of multi-mobile robots based on improved fast marching square method [J]. Journal of Dynamics and Control, 2023, 21(12): 92–102. (in Chinese)
- [9] 闵熔祺, 张舒. 多移动机械臂系统动力学建模以及稳定性分析 [J]. 动力学与控制学报, 2023, 21(12): 103–109.
- MIN R Q, ZHANG S. Dynamics modelling and stability analysis of a multi-mobile robotic manipulator system [J]. Journal of Dynamics and Control, 2023, 21(12): 103–109. (in Chinese)