

具身智能机器人系统研究探索

石为人

(重庆大学自动化学院 重庆 400044)



石为人,重庆大学二级教授,博士生导师,香港中文大学(深圳)研究员,深圳市人工智能与机器人研究院主任研究员,重庆市检测技术与自动化装置学术技术带头人,中国仪器仪表学会会士,《仪器仪表学报》副主编,重庆市自动化与仪器仪表学会名誉副理事长,重庆市机器人学会专家委员会主任,重庆市机器人产业技术创新战略联盟专家组组长,香港中文大学(深圳)机器人与智能制造国家工程实验室学术委员。

新一代人工智能时代,具身智能迅速推进优质生产力的发展。具身智能机器人一直围绕感知、决策、执行的闭环自治展开理论与技术研究。仪器仪表学报“具身智能理论与技术专题”,汇集了机器人与下肢外骨骼具身智能研究论文,研究具身智能机器人理论框架,技术闭环与工程实现等理论与技术;研究具身智能重构“运动”,人机神经闭环,重塑运动认知等理论与关键技术,使机器成为人体神经系统的延伸,使机器人、灵巧手、外骨骼不再是机械执行,而是大脑、身体与环境共同参与的动态学习行为。论文作者共同探索智能机器人主动探索未知物理世界、生成新知识、实现智能自进化的过程。在不同的问题中,思考智能机器人在无明确任务目标时,仍能自发提出问题、设计实验、反馈信息并修正认知,逐步实现通用具身智能。期刊编辑专题,旨在推进仪器仪表领域多学科交叉融合,探索学报在人工智能驱动科研的新范式下重构。

艾伦·图灵1936年提出著名的“图灵机”模型和一种理论上能够执行任何可计算的数学函数的计算装置,重塑了人对计算、智能与机器的理解。1945年,法国二十世纪著名哲学家和思想家梅洛·庞蒂,在《知觉现象学》中提出了人的具身性与具身认知的概念。人的身体不仅是一个物理实体,而是与环境 and 认知过程紧密相连,通过身体感官(如视觉、触觉)意向性直接与世界互动。如盲人通过手杖扩展感知边界,婴儿通过触摸、运动感知世界,身体作为认知的原始界面,体现了人的知觉的具身性,无声地构建对世界的理解。人的理性思维不能脱离身体的抽象活动,由身体的经验沉淀而来。例如,语言表达需依赖喉咙肌肉的物理运动,抽象概念源于身体对环境的体验,也就是说,人的意识同样依赖于身体,身体作

为认知的本体基础。人通过环境与身体的动态交互,感知与行动的统一性,构造了整体认知观,“认知-身体-环境的共构系统”是认知的生成性与延展性。认知不是存在于人的大脑中的孤立过程,而是与人的身体的物理属性、动作以及与环境互动的方式密切相关。身体经验在认知中的作用,构成了人与世界互动,以及对世界的理解。人的身体与精神融合,身体与心智密切联系,人在感知环境中不断学习,拥有智慧。人期望机器“感知—行动—理解”世界,有效解放自身肢体与大脑,重构生产力。

诺伯特维纳在1948年创立的控制论,思想基础来自自动调节装置与生物反馈系统,通过信息闭环控制,实现系统动态平衡与自适应优化,奠定了智能机器发展的基础。1950年,艾伦·图灵发表了《计算机器与智能》论文,提出著名的“图灵测试”。通过测试,如果一台机器能够在纯文本对话中,与人类进行无法区分的对话,那么就可以认为这台机器具有智能。艾伦·图灵为人工智能设定了历史上第一个可操作的智能判据,将智能问题转化为工程可测问题,奠定了人工智能的实验基础。1955年8月31日,约翰·麦卡锡、马文·明斯基、克劳德·香农与纳撒尼尔·罗切斯特在提交给洛克菲勒基金会的《达特茅斯夏季人工智能研究项目提案》中,首次提出“人工智能”,构想通过自动计算机、编程语言、神经网络、计算理论、抽象、随机性与创见性,实现机器对人类智能的模拟。1976年,艾伦·纽厄尔与赫伯特·西蒙提出物理符号系统假说,主张心智即符号系统,强调智能是对符号的操作,最原始的符号对应于物理客体的概念。人的思考可以被编码,用符号描述,机器能够学习智能。1991年,布鲁克斯与瓦雷拉等人对“身体在认知中核心

作用”的革命性重构,智能算法和物理实体的感知、行动和环境交互相结合,使机器能够通过更加自然、智能的方式与环境进行交互并解决问题,重新发现并诞生了具身智能。

本期专题综述研究了具身智能跟随移动机器人的进展与未来的挑战。重点描述情境化智能体内核,机器人在环境中运行状态转变机器人通过身体理解环境,产生自然高效的人机交互与协同策略,执行行动的范式。跟随移动机器人在环境深度认知、身体动态适配与智能持续演进等方面的主要技术挑战,并对算法泛化性、场景适应性与长期自主学习能力等未来发展方向进行了展望。而基于三维几何世界模型的具身智能方法,聚焦解决非结构化场景下的精细操作难题,提出了基于三维几何世界模型与条件流匹配策略的具身智能操控方法。机器人欠驱动灵巧手的多模态人机交互及智能抓取系统技术,同样是关注的热点。论文构造的具备结构简化、柔顺抓取和多模态感知能力的刚柔耦合结构的欠驱动灵巧手,是一种可供参考的方法。

具身智能机器人发展很快,提升机器人的泛化能力,多模态感知融合,仿真环境到真实物理世界,因果推理与自主决策能力仍然是挑战。一种可吸附连续体机器人,由多节卵棒柔性关节与气压吸附单元串联结构组成。可主动吸附接触环境,自身结构锁定,增强整体刚度。解决航空发动机原位检测存在的驱动能力差、控制精度低、负载能力弱与结构刚度不足等问题。一种分层采样搜索的轮式移动机械臂全身规划方法,在复杂受限环境条件下,可协调移动基座与机械臂的运动,实时生成全程无碰撞的全身运动轨迹,算法规划时间、路径长度与平滑度等均表现出显著优势。基于深度强化学习的仿蟹八足机器人运动控制方法,通过模仿螃蟹步态参考动作端到端深度强化学习训练框架,引入行为克隆初始化策略加速收敛,采用分阶段强化学习方法逐步增加地形难度,机器人可由平地步态稳定迁移至复杂地形。基于标准球的接触式测量机器人弹性测针工具坐标系标定方法,通过测针直径校准、主弹性测针工具坐标系迭代标定、星型弹性测针工具坐标系相对迭代标定方法,获取多弹性测针的工具坐标系,实现多测针协作测量。在大部件装配位姿的跨尺度高精度、特征通用性好、多测针协同测量的工程应用方面,可供参考。基于能量传递的减速器反向传动性能动态表征及测试方法,可对不同转速、不同工况下反向传动性能进行定量评估,提高机器人力反馈精度。基于挖掘机器人轨迹跟踪控制优化及协同评价,构建挖掘机器人机械系统、液压系统和轨迹跟踪控制系统联合仿真平

台,可支持挖掘机器人在作业工况下能效协同优化机制的仿真实验验证。

下肢外骨骼具身智能技术,让机械腿不再是辅助行走的工具,重新定义了人的身体能力边界的智能共生体。意图识别、动态助力、神经重塑、反馈学习闭环,仍然是难点。一种无源下肢外骨骼助力机器人结构优化与助力效能评估研究,通过优化腿部结构设计,降低自重和摆动相的转动惯量,结合三自由度髋关节结构优化设计,有效消除了非自主晃动并提升了人机相容性。样机实验结果,穿戴者肌肉负担与能量消耗得到有效的降低。基于生理肌群特性与双分支融合网络的下肢运动模式识别方法,实现了运动意图与负载工况特征的动态解耦与加权融合,通过在边缘计算终端上的迁移性测试,算法在亚毫秒级推理下的执行稳定性,为外骨骼机器人在复杂负载环境下的精准意图识别提供了可靠的算法支撑。在线增量动态运动基元(DMP)的自适应柔顺控制策略,配置一种自制的轻量化准直驱膝关节外骨骼,在不干涉人体固有步态节律的前提下,可实现非对称步态的在线实时生成与自适应柔顺跟随。一种基于深度视觉与惯性测量单元多模态融合的非侵入式下肢肌肉力预测与控制方法,引入双分支时空特征融合深层网络和自适应注意力机制,将肌肉力变化连续映射为外骨骼的辅助刚度,并实现了感知与控制闭环,为复杂动态环境下外骨骼高鲁棒按需辅助控制提供了新路径。基于投影约束的多传感器融合自平衡下肢外骨骼质心状态高精度估计方法,采用卡尔曼滤波框架,融合质心与双足 IMU 测量信息、足底力/力矩传感器数据以及下肢运动学约束,实现对质心位置、姿态及其速度状态的精准估计,辅助自平衡下肢外骨骼平衡控制与安全行走。一种泛化的下肢多关节角度预测方法,通过构建可实现跨速度和跨受试者泛化的关节角度预测模型和非冗余肌肉协同特征提取算法,可提高髋、膝关节角度预测精度,增强关节角度预测的跨任务泛化能力。

综上所述,拥有感知世界、理解意图、用身体学习的具身智能机器人系统,将从“单体智能”向“群体协同与环境共生”演进。更多的论文作者将持续研究探索,发现新问题、识别关键变量、开拓认知边界为目标的初始性、非结构化研究,取得更多、更优秀的科学研究成果与论文,涌现更多的前沿科学理论与技术研究专题。具身智能将推进重构仪器仪表的技术范式,加速仪器仪表从“执行工具”向“科学主体”的范式跃迁。具身智能仪器仪表将围绕感知-决策-执行的闭环智能体,从传统测量向智能传感范式推进,构建仪器仪表为核心硬件单元,深度集成 AI 大模型的科学实验平台,突破仪器孤岛的关键引擎,统一通信与接口生态,从人操作仪器向仪器驱动智能的数据闭环技术发展。