

· 研究进展 ·

机器人研究进展与科学挑战*

刘辛军¹ 于靖军² 王国彪³ 赖一楠^{3**} 何柏岩³

(1. 清华大学机械工程系, 北京 100084; 2. 北京航空航天大学机器人研究所, 北京 100191;
3. 国家自然科学基金委员会工程与材料科学部, 北京 100085)

[摘要] 机器人基础理论与关键技术是当前学科交叉领域的研究热点之一, 已被美、欧、日、韩等国家和地区列为战略计划。围绕该主题, 在国家自然科学基金委员会第 121 期和第 146 期“双清论坛”研讨成果的基础上, 结合国家重大需求和学科发展前沿, 从结构、感知、控制等方面阐述了当前机器人的研究热点及发展趋势, 提出共融机器人将成为新一代机器人研究的主流; 提炼出共融机器人基础理论与关键技术中亟需解决的若干挑战问题; 指出了目前国内在该领域的研究基础与不足之处, 给出了在该领域未来 5~8 年需重点发展的方向建议。

[关键词] 机器人; 协作; 自然交互; 智能

自 1959 年世界上第一台工业机器人问世以来, 机器人研究取得了巨大进展, 已在制造业、服务业、国防安全和太空探测等领域得到了广泛应用。2013 年, 《美国机器人发展路线图—从互联网到机器人》预言机器人是一项能像网络技术一样对人类未来产生革命性影响的新技术, 有望像计算机一样在未来几十年里遍布世界的各个角落^[1]。

机器人是力学、机构学、材料学、自动控制、计算机、人工智能、光电、通讯、传感、仿生学等多学科交叉和技术综合的结晶。2014 年, 美国《Science》杂志出版机器人特刊, 报导以柔性、软体、变形为主要特征的最新机器人技术, 充分反映了软材料、柔性电子、弹性力学、仿生学、计算科学等学科在机器人的交叉融合^[2-3]。2015 年初, 基于液态金属的可变形机器人问世, 迅速在国际上引起强烈反响^[4]。2016 年, 美国《Science》杂志创立机器人子刊, 将机器人研究推向新的科学高度。与此同时, 机器人也成为世界各国在高科技竞争中的焦点、热点和战略制高点, 被列为国家优先发展的研发与产业化技术。2011 年, 为配合制造业回归和再工业化国家战略, 美国开始推行“先进制造业伙伴计划”, 投资 28 亿美元开发基于移动互联技术的机器人; 2012 年, 韩国发布了

“机器人未来战略展望 2022”, 支持扩大韩国机器人产业并推动机器人企业进军海外市场; 2013 年, 德国提出“工业 4.0”计划, 支持发展基于机器人技术的智能制造系统; 2014 年, 日本发布“新经济增长战略”, 将机器人产业列入七大重点扶持产业之一, 5 年内力争实现机器人普及、提高生产效率、解决劳动力短缺问题; 我国台湾地区提出机器人技术发展三步走战略, 短期重点聚焦制造业机器人, 促进制造业产业升级, 中期侧重环保节能理念, 重点发展新兴绿色产业用机器人, 长期侧重人类生活需求, 重点发展医疗与观光服务业机器人。习近平主席在 2014 年的“两院院士大会”上指出: “机器人是制造业皇冠顶端的明珠, 其研发、制造、应用是衡量一个国家科技创新和高端制造业水平的重要标志”。机器人已被列为中国“十三五期间”计划实施的 100 个重大工程及项目之一。

“双清论坛”是国家自然科学基金委员会(以下简称“基金委”)主办的高层次战略性学术研讨会, 是确定学科优先资助领域的重要途径之一。针对当前国际机器人发展大潮和中国机器人研究面临的重大机遇, 2014 和 2015 年, 基金委分别在大连和哈尔滨召开了第 121 期和第 146 期双清论坛, 主题分别为

收稿日期: 2016-07-27; 修回日期: 2016-08-13

* 本文根据第 121 期和 146 期“双清论坛”的研讨内容整理。

** 通信作者, Email: laiyin@nsfc.gov.cn

“机器人理论与关键技术”和“未来机器人：展望与科学挑战”。来自国内外50余所高校、科研院所、工业界和管理部门的11位院士和百余名机械工程、自动化科学、信息科学、数学、力学和生物医学等领域的专家学者参加了研讨。旨在剖析我国机器人基础研究现状，聚焦国际机器人学术前沿，探讨未来我国机器人研究的重点。与会专家分析了新一代机器人基础理论、关键技术、前沿进展和国家需求，确定“共融机器人”应作为未来机器人研究的重点，初步凝练了共融机器人领域的若干关键科学问题，梳理了未来5~8年的重点研究方向。

1 研究新一代机器人的背景与意义

上世纪50年代，美国诞生了最早的一类机器人——工业机器人；70年代，大规模的工业生产需求使得工业机器人在日本得到了爆发式增长，造就了日本机器人产业发展的黄金20年，支撑其成为世界制造强国。上世纪70~80年代，随着传感器与控制技术的快速发展，面向任务的智能机器人开始出现，其主要特征是通过传感器反馈实现机器人与人的信息交互，智能机器人类型从工业扩展到特种、服务等行业。目前，尽管工业机器人已广泛应用于各大门类工业领域，但主要应用于结构化环境中执行各类确定性任务，其面临着操作灵活性不足、在线感知与实时作业能力弱等问题；服务机器人作为应对未来全球人口老龄化加剧的核心手段，仍存在难以接受抽象指令、人机有效沟通能力差、人机协调合作能力不足、安全机制欠缺等问题；特种机器人作为代替人类在极地、深海、战场、灾害等危险甚至不可达区域执行任务的重要工具，存在着依赖离线编程、在动态未知环境中缺乏自主能力、依赖人类远程操作等问题。总之，机器人在结构、智能和自主方面与人类的需求和期望仍存在着巨大差距，机器人的进一步发展必然要寻求作业能力的提升、人机交互能力的改善、安全性能的提高。

随着微纳与仿生技术、智能材料、人工智能技术、互联网、大数据技术等加速渗透，全球机器人市场、技术创新与产业应用呈现新的发展需求，世界已进入了“智能制造”时代。特别是以定制化服务、车间快速重组等为主要特征的高端制造业，更离不开智能机器人的支撑。而这类机器人的主要特征是将人类智慧物化于机器中并组成人机合作系统，使机器人可进行感知、推理、决策和学习等智能活动，通过人与智能机器人合作共事，扩大、延伸人类

的作业能力，在一定程度上甚至能够取代人类完成各种任务。因此，在解决国家和社会发展过程中面临的产业升级、人口老龄化、医疗/健康服务、国防安全、资源开发等众多挑战中也可以发挥核心作用，成为服务国家战略的重要使能工具。

针对此类新一代机器人，欧美发达国家纷纷设立了专门的研究计划。美国于2012年发布了美国国家机器人计划(NRI, National Robotics Initiative)，提出将合作机器人作为研究的重点，优先资助用于制造业、空间和海洋探测、医疗保健和康复、军用和国土安全、环境监测、基础设施防护、食品生产、生产营销、提高生活质量的辅助设备、安全驾驶等领域的机器人基础理论与应用研究^[5]。2010~2014年间，欧盟启动的“第七框架”、“地平线2020”、“火花”等一系列计划中，也明确将合作机器人作为研发重点：融合机电一体化、人工智能、多模态感知、新能源、新材料、网络通讯、认知科学、人机交互、仿生设计等最新技术，研究更具竞争力的系统工具、人机交互机制、机器人自主意识等核心技术，广泛用于先进制造、应急救援、公共安全、医疗康复、助老助残、智能家居、教育娱乐等领域。

进入新世纪以来，随着我国工业转型升级、劳动力价格上涨、资源与环保制约以及老龄化社会的到来，中国发展的人口红利正在不断消失，国计民生所关心的主要问题聚集在：(1) 面向提高经济发展质量和效益，着力提升“中国制造”的品质和“中国创造”的影响力；(2) 面向保障国家安全，解决关乎国民安全、信息安全、国防安全等重大科技问题；(3) 面向增进民生福祉，用科技和创意解决公民衣食住行和其他日常生活中的难题；(4) 面向生态建设和可持续发展，促进环境保护、能源资源开发和高效清洁利用等。这一切都促使我国成为全球最大的机器人需求国。人机合作的智能机器人作为构建我国未来创新型社会的重要科技手段，经济和社会价值巨大。

智能机器人研究不仅是国家战略的需要，同时作为学科前沿交叉的典型代表，已成为国家科技创新与发展的助推器。大数据与互联网、智能材料、仿生、微纳、3D打印、柔性多体动力学、传感与控制技术等快速发展使得以合作、融合为特征的新一代智能机器人成为可能。

近三十年来，在国家自然科学基金和“863”等计划的大力资助下，我国在机器人基础理论与关键技术上都取得了显著进步，但在机器人领域取得的原

创性研究成果还偏少,制约我国机器人发展的技术瓶颈亟待突破。因此,围绕机器人学科前沿,面向高端制造、医疗/康复、国家安全等重大需求,着力研究新一代机器人基础理论与关键技术,对于我国机器人技术和产业取得源头创新成果、实现跨越式发展具有重大的理论和工程意义。

2 研究进展

结构、感知和控制是机器人的传统三要素,本节仍将沿用这一分类对机器人基础理论与关键技术方面的相关最新研究进展做简要综述。

2.1 结构

自第一台机器人发明以来,刚性、串联一直作为机器人的主要结构特征。直到1965年Stewart平台的出现,将机器人构型从串联扩展到并联,但刚性特征一直保留,相应的机器人分析与设计理论完全建立在刚体运动学及动力学基础之上。上世纪70~80年代,出现了以抑制变形为目标的柔性杆机器人动力学研究^[6-7]。80年代末,随着柔性机构的出现^[8],利用柔性变形的微纳与仿生机器人逐渐成为机器人学领域的热点研究方向。进入本世纪后,随着仿生技术、新型智能材料和计算技术的迅猛发展,刚柔耦合、柔性、软体、变形体机器人的研究突飞猛进,引领了国际变形机器人的前沿研究热潮。例如针对铣/钻/抛/磨削加工、高速轻载操作等工业与产业需求,机器人结构逐步从刚体、刚柔混合发展到柔体;机器人构型从串联、并联发展到混联。针对医疗康复、助老助残、国家安全等应用特殊需求,机器人结构则更进一步发展到软体甚至流变体,以实现

对任务及环境的高度适应和安全可靠操作。刚柔耦合及柔性机器人又统称为软机器人^[9]。IEEE Robotics and Automation Society新成立了软机器人技术委员会,2014年创办了学术期刊《Soft Robotics》。当前学术界对软机器人的研究主要分为两大类:连续体机器人和软体机器人。上世纪90年代,日本和美国初步建立了连续体机器人的理论框架。近二十年来,美、日、欧多家研究机构不断开展连续体机器人理论和关键技术的研究。英国OC Robotics作为世界上唯一商业化的生产连续体机器人的公司,开发了多款连续体机器人,实现受限空间与危险环境下的检测和维护任务。软体机器人更是成为科学与学术前沿的新宠,2010年以来软体机器人研究成果在Science、Nature及子刊、PNAS等连续报道。代表性研究主要有:新型软体功能材料的

力学特性、大变形驱动机理、非线性动力学行为、新型驱动,以及驱动—传感—控制一体化的软体机器人设计与控制等^[9]。不过,目前国际上对于软机器人的研究工作还处于初始阶段。

以折叠机器人、变形翼飞行器为代表的变形机器人研究也越来越受到国际顶级研究机构的重视。MIT和哈佛大学通过将折纸艺术和电子工程技术相结合,研制出一种可重构、可改变形状的机器人原理样机^[4]。2015年,美国FlexSys公司研发的Flex-Foil变形机翼式无人机完成了首次试飞。目前,中国学者在折展、变胞机构学方面的基础理论研究方面处于国际领先水平^[10-11],但学科交叉与应用方面“略显不足”。

除了结构本体外,驱动与传动也是组成机器人本体不可或缺的元素。为适应新一代智能机器人结构本体的变化(柔、软、变),探求具备集成化、柔性化、小型化、高功率密度的驱动、传动机理及技术的研究渐成热点^[5]。最典型的莫过于对形状记忆合金等智能材料的研究^[12]。1992年,人工肌肉(IPMC)的电驱动特性被发现,20余年间,这项技术得到了长足发展,出现了多种新型驱动传动集成化的机器人专用驱动器^[13]。此外,借助各类软智能材料将驱动、传动与结构集成一体,如哈佛大学等在介电高弹材料驱动器方面的探索^[14]。此外,具有高功率密度特征的液压式及电液混合式驱动器在大负载仿生机器人中也得到了成功应用^[15]。不过,作为机器人研究领域内的基础和热点问题,对新型驱动、传动机理及技术的研究总体上尚处于原理探索及样机实验阶段。

机器人动力学方面,理论研究相对超前,刚柔耦合动力学即是典型代表。对刚柔耦合机器人动力学的研究最早可追溯到1972年Mirro的工作^[16]。经过40余年的发展,主要进展包括:(1)建立了各种不同柔性模型并考虑接触碰撞效应;(2)发展和完善了相应的动力学分析方法和计算方法;(3)建立了智能驱动和环境交互动力学理论;(4)构建了新型柔性、软体材料及其复合结构基体的仿生机器人动力学新理论等^[17]。在智能驱动和环境交互动力学理论研究方面,以俄罗斯科学院Chernousko为代表的学者开展了不少高质量的研究,在系统优化、控制策略和实验研究等方面取得了重要进展^[18]。当前,机器人动力学研究的主要不足在于理论与实践有些脱节。

综上所述,弹性和软物质材料的应用提升了机

器人与人/环境协作/交互的适应性,其快速发展在一定程度上促进了机器人研究的步伐。但在结构—驱动—控制一体化设计、高效驱动传动机理、非线性动力学控制等方面仍面临新的挑战。

2.2 感知

感知是器人与人、机器人与环境、以及机器人之间进行交互的基础^[19]。就感知技术而言,除了多传感信息融合依然是研究热点之外,机器人越发呈现出与脑神经科学、生物技术、人工智能、认知科学、网络大数据技术等深度交叉融合的态势。2013年欧盟旗舰项目投资10亿欧元支持人脑研究计划(HBP),该项目设置了6个验证平台,神经机器人是其中之一,以机器人作为载体,验证、实现脑科学研究的成果。美国、法国、西班牙等研究机构开展了多种基于演示的规划和策略学习、系统级语义泛化和转移泛化方面的研究^[20]。欧盟组织了RoboEarth研发团队,将机器人技术同互联网的云计算系统相联接,利用远程数据中心提供的专业化智能服务,实现机器人之间的知识分享,并提供执行各类复杂功能任务的服务。在计算机视觉和图像处理领域,近年来人的姿态分析与行为识别,受到广泛的关注并取得了重要的研究成果,如建立了个体行为识别数据库等。生物技术也在不断引入,脑生肌电、脑—机接口(BCI)技术最近几年在国内外得到了广泛的关注和研究^[21-22]。

2.3 控制

日本机械学会将机器人智能分为五个等级:级别I:非自主运动;级别II:弱自主运动;级别III:部分自主运动;级别IV:半自主运动;级别V:完全自主运动^[23]。在2011~2020年这十年,期望机器人智能进入第IV级范畴,即具备认知能力与灵活的物体操作、与人合作交互。

因此,高度智能是对新一代机器人的重大共性技术需求。当前工业机器人应用面虽然越来越广,但在复杂作业能力、自适应可重构的装配能力、对非结构环境的感知能力、以及与人协作能力方面需要更加智能化。服务机器人市场正面临爆发,主要挑战包括自然交互、人机安全、环境适应、复杂灵巧作业等方面,智能化是应对挑战的可行技术途径。工作于复杂环境的特种机器人,需要更为智能化的环境感知和适应能力、人机协同作业能力和异常处理能力。

先进的控制算法是实现机器人高度智能的主要手段。从传统的力矩控制、位置控制到力位混合控

制都已经相对成熟,智能化控制与人工智能已成为机器人技术的重要发展方向。比如,在人与机器的互适应学习与控制方面,学术界已经提出了一些学习型控制算法,包括:基于迭代学习的控制(ILC)^[24],基于增强学习的控制(QL)^[25],基于神经网络补偿未知动态建模的非线性控制方法(NN)以及基于示范的学习型控制方法等,并应用到两足机器人、机械臂、Bigdog等平台控制中。此外,人机交互、人机一体的控制策略也在研究中,在柔性外骨骼等系统中得到了初步应用^[26]。

3 技术与科学挑战

3.1 技术挑战

美国于2011年启动的先进制造伙伴计划中指出:“新一代机器人将与人类操作者紧密合作,为产业工人、健康服务者、士兵、手术医生、以及宇航员等完成复杂任务提供新的能力”^[27]。然而,现有的机器人系统要达到在人类正常的生产、生活环境中成为人类助手的目标,还面临诸多技术挑战。目前,机器人仍未脱离自动化机器的范畴;人与机器人仍然被定义为使用和被使用、替代和被替代的关系,而不是人与机器人的合作伙伴关系。机器人在设计过程中很少考虑与人在同一空间内紧密协调合作,使得如本质安全、人机协同认知和行为互助等基本问题都没有得到很好解决。要从根本上解决目前机器人与新需求之间的矛盾,需要重新审视其核心技术的发展理念。在人与机器人的关系上,人的优势是智、灵、变,包括思维与逻辑推理、学习与技能递进、经验与实时决策等;而机器人的优势是精、稳、准,包括速度、精度、负重、重复一致性、耐疲劳、连续作业等。

在技术上,亟待突破的挑战可以凝练为三个方面:(1) **安全挑战**:机器人与人之间的物理界限消失,人和机器人将频繁接触,要求机器人在行为过程中确保人一机一物的安全;(2) **行为挑战**:要求机器人在非结构、不可预知动态环境中完成使命,任务目标及指标更加多样、操作灵活性及柔性要求更高、人机合作程度加深、任务过程复杂多变;(3) **交互挑战**:要求具备多信息源综合的交互手段,具有人类意图理解能力,机器人与人状态信息能实时双向传递。

上述三方面挑战是机器人与人融合中亟待突破的瓶颈问题,也是目前国际机器人学领域研究的重点和难点问题。

为满足新兴制造业、民生服务业、特种行业的新需求,机器人必须突破在结构化环境下专业人员操

作、作业预编程、与人隔离的传统模式,在需要与人密切接触、密切交互、密切协作的应用领域中,应对环境复杂性、作业对象复杂性、任务复杂性、人机安全复杂性的挑战,应建立起一种新型的“共融”模式^[28]。“共融”是新一代机器人区别于传统机器人的最重要的特征,具有这种特征的机器人,我们称之为“共融机器人”,涉及机构、控制、感知、交流、理解、认知、学习、协作、安全,乃至伦理、法律、心理、情感等多方面的研究。

3.2 科学挑战

如前所述,刚柔耦合/柔软体/变形机器人设计与控制、智能交互与感知等研究取得若干突破性进展,为共融机器人研究提供了坚实的理论与技术基础,同时也面临着一系列亟待解决的难点与科学挑战。

(1) 机构与驱动方面,有待深入探究机器人性能对任务及环境的适应性规律,为共融机器人结构创新提供理论依据

为更好地适应复杂性的作业环境,充分保障人机安全,刚柔耦合、柔软、变势必将成为共融机器人的主体结构特征。虽然在结构、驱动、控制等方面取得了一些重要的研究进展,但这类机器人性能对环境及作业的适应性规律仍未明晰,限制了相关设计理论的发展。

共融机器人是典型的多学科交叉与融合特征比传统机器人更加突出的智能装备,同时也增加了结构集成设计、动力传递方式的多样化和复杂性。

例如,对于刚柔耦合型及柔性机器人,当大变形问题出现时,传统的基于小变形假设不再有效。在柔性机器人动力学领域,利用压电智能材料进行机器人柔性机械臂的振动控制是一大热点,机电耦合问题不可忽视。因此针对刚柔耦合机器人和柔性机器人,目前需要解决的是考虑刚柔耦合、大变形、碰撞和变拓扑、多物理场耦合等关键因素的建模、分析和高效计算科学问题上的突破。对于软机器人,现有材料在应力、应变、响应速度、寿命等方面存在一定的缺陷,尚不能满足软机器人的需要。同时,作为软机器人设计的重要依据,软材料在电、磁、光、热、酸碱度等外场或环境作用下的宏观大变形规律,以及在被动受力时的非线性本构关系等,目前尚未完全明确。软机器人的设计方法也远未成熟。

驱动传动技术关乎机器人能量的转换和动力传递,是推动机器人革新不可或缺的关键技术,总体发展趋势是由分体向集成发展、由刚性向柔性发展、由

外驱动向自驱动发展。目前以电力为主体的传统驱动器体积偏大、效率较低、响应较慢,且多需匹配复杂的传动机构;而 IPMC 等直驱型驱动器以及自驱动液态金属等,尚处于研究的初级阶段,仍有很多关键科学问题需要解决与研究。亟需发展高功率密度、自驱动等新的驱动传动理论与方法等。

(2) 交互与感知方面,需深入研究机器人、人与环境之间的自然交互机理与安全机制,为机器人与人的智能融合提供技术保障

在交互与感知方面,共融机器人的基础研究应专注于在共用的自然空间内,实现机器人与人的信息共融、经验知识共融、操作技能共融、计算智能与人脑智能共融、人机安全共融,并重点考虑如下几方面的问题:1) 环境感知、描述与理解问题:如何感知自然(非人工)、不可预知、动态变化、复杂的环境,并对其进行描述、建模和理解;2) 人一机器人自然交互与理解问题:如何感知和理解语言、手势、文字、表情、行为、人体神经信号等的内在含义和意图,并能予以反应或响应;3) 人一机器人行为的协同与控制问题:如何使机器人与人的行为或意图协调一致,以保证达到预期目标;4) 人一机器人智能融合与进化问题:如何将人的智能和计算智能相结合,利用人与机器人感知、认知、决策等交互提升人机共融系统智能水平;5) 人机共融安全问题:如何保证人一机器人合作过程中的人机安全等。

(3) 智能与控制方面,有待系统研究自主行为控制与群体智能机理,为共融机器人资源与行为管理提供技术保障

共融机器人的智能主要反映在其自主行为控制的能力和水平上,可实现与灵长类动物的行为控制具有可比性的智能,无疑对学术界是个巨大挑战。多机器人和规模化群体协同作业更使得自主控制和群体智能问题变得尤为突出。

此外,为有效解决共融机器人多态性与资源管理一致性的矛盾,对机器人操作系统也提出了挑战。传统计算机操作系统基于进/线程、虚存、文件系统等一系列模型对计算、存储设备进行抽象和管理,而基于何种模型对多机器人和规模化群体的复杂资源进行抽象、管理及控制,目前尚无有效的方法。类如群体动物中拥有的分布式结构也许是个途径,但如何适应这种分布式结构的机器人操作系统体系架构是另一需要研究的基础性问题。

4 国内研究基础与不足

在基金委的支持下,我国在机器人理论与关键

技术研究方面取得了显著进展。基于 Web of Science 的统计显示,2005~2015 年间,在 JCR 收录的机器人主题的专业期刊上,全球学者共发表机器人主题论文 15 429 篇,其中,中国学者共发表论文 2 017 篇,占 12%,远超过日本、韩国等机器人研究较为活跃的国家。在并联、柔性、变形、软体等机器人机构设计理论与动力学控制、分布式机器人操作系统、智能环境感知与脑机交互技术等方面取得了世人瞩目的研究成果,为下一步开展共融机器人研究提供了坚实的理论与技术基础。2008 年,熊有伦院士联合国际知名学者发起设立了“智能机器人与应用国际会议(ICIRA)”,每年聚集全球近 500 名顶级的机器人科学家和工程师,轮流在国际知名大学召开年会,交流机器人领域的最新学术成果和产业发展动态,在国际上产生了重要影响。同时,机器人领域已形成了一支具有较高水平的研究队伍,其中包括两院院士、国家杰出青年科学基金获得者、“长江学者”特聘教授、“千人计划”特聘教授、国家优秀青年科学基金获得者等。研究队伍广泛分布在高等院校、中国科学院及科研院所,建立了多个条件设施良好的机器人研究基地。通过与国际顶级机器人研究机构建立长效合作机制,合作开展前沿机器人研究。

同时也注意到,近十年来,中国学者在 *IEEE Trans. on Robotics*、*Int. J. of Robotics Research*、*ASME J. of Mechanisms and Robotics* 等机器人领域的国际权威期刊上论文数量依旧偏少,与美国和欧洲存有较大差距。*Science*、*Nature*、*PNAS* 等国际权威期刊以及机器人专业期刊上的 ESI 高被引论文中鲜见中国学者的身影。从中反映出原创性成果较少,学科交叉的活力不足。

国外数十年的实践表明:制定合理、完善的基础研究规划并长期投入,新颖的研究思路、有力的理论支撑和先进的方法工具,是支撑机器人基础研究和产业发展的成功经验,这也是我国提高机器人基础研究水平、培养优秀中青年人才和缩短机器人技术差距的必经之路。

5 未来 5~8 年的重点研究方向

(1) 集成设计与动力学控制。构建多场约束运动机构创新及刚柔耦合系统集成设计理论,突破高能量密度新型传动、驱动技术,研究刚—柔—软耦合机器人动力学控制及高效计算方法。

(2) 主动感知与自然交互理论及方法。研究复

杂动态环境下知识的主动获取、学习与推理方法,视觉认知与基于动态环境的主动行为意图理解与预测理论,机器人的自主学习与机器人知识增殖方法,以及多模态人机协作的态势感知与自然交互方法。实现机器人与人之间相互的意图理解、信息交流,以及自然和谐的情感交互。

(3) 自主控制与灵巧操作。深入研究面向复杂环境与复杂任务的自主控制,辨识机器人的动力学行为和智能操控与环境之间的关系和影响规律,实现机器人灵巧作业与自主控制。

(4) 操作系统与软件体系。揭示机器人多态性的共性谱系和差异表型的内在机理,构建多态智能群体机器人操作系统以及面向共融机器人的数据驱动与支撑环境等。

6 结束语

机器人基础理论与关键技术研究具有“国家重大战略需求明确、学科交叉研究综合度高、国内具有良好研究基础”等特点,同时也面临着“世界各国加紧部署突破,抢占技术前沿与市场”等机遇与挑战。应及时抓住国家重大战略发展的需求,瞄准国际学科前沿,针对机器人基础理论与关键技术的核心科学问题开展深入、系统的研究,为新一代加工制造机器人、服务机器人、特种机器人等自主研发提供理论和技术支撑。

致谢 本文在撰写过程中得到了王天然院士、郑南宁院士、杨学军院士、丁汉院士等专家的大力支持和帮助,特此感谢。

参 考 文 献

- [1] A roadmap for U. S. robotics, from internet to robotics, 2013 edition. <http://robotics-vo.us/sites/default/files/2013%20Robotics%20Roadmap-rs.pdf>.
- [2] Ijspeert A J. Biorobotics: Using robots to emulate and investigate agile locomotion, *Science*, 2014, 346 (6206): 196—203.
- [3] Felton S, Tolley M, Demaine E, et al. A method for building self-folding machines, *Science*, 2014, 345(6197): 644—646.
- [4] Zhang J, Yao Y, Sheng L, Liu H. Self-fueled biomimetic liquid metal mollusk. Article first published online: 3 MAR 2015 | DOI: 10.1002/adma.201405438.
- [5] National Robotics Initiative (NRI). The realization of co-robots acting in direct support of individuals and groups. http://www.nsf.gov/pubs/2014/nsf14500/nsf14500.htm?WT.mc_id=USNSF_25&WT.mc_ev=click
- [6] Book W. Analysis of massless elastic chains with servo-controlled joints. *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 1979, 101: 187—192.

- [7] 刘宏昭, 曹惟庆, 张启先. 刚柔耦合的机器人动力学方程及其解. 应用力学学报, 1991, 8(2): 35—44.
- [8] Howell LL. Compliant Mechanisms. New York: Wiley Interscience, 2001.
- [9] Morin S A. Camouflage and display for soft machines, Science, 2012, 337(6096): 828—832.
- [10] 国家自然科学基金委员会工程与材料科学部. 机械工程学科发展战略报告. 北京: 科学出版社, 2010.
- [11] Chen Y, Peng R, You Z. Origami of thick panels, Science, 2015, 349: 396—400.
- [12] Lagoudas D C. Shape memory alloys: Modeling and Engineering Applications. Berlin: Springer, 2008.
- [13] Anton M, Punning A, Aabloo A M, et al. Towards a biomimetic EAP robot. Proceeding of Towards Autonomous Robotic Systems, 2004: 6—8.
- [14] Koh S J A, Zhao X H, Suo Z G. Maximal energy that can be converted by a dielectric elastomer generator. Appl Phys Lett, 2009, 94: 262902.
- [15] Chen X B, Gao F, Qi C K, et al. Spring parameters design for the new hydraulic actuated quadruped robot. Journal of Mechanisms and Robotics, 2014, 6(2): 97—110.
- [16] Mirro J. Automatic Feedback Control of a Vibrating Beam. Master's Thesis, MIT, Cambridge, M. A. 1972.
- [17] 钟万勰. 应用力学的辛数学方法. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [18] Chernousko F L. Analysis and optimization of the motion of a body controlled by means of a movable internal mass. Journal of Applied Mathematics and Mechanics, 2006, 70(6): 819—842.
- [19] 王田苗, 陶永, 陈阳. 服务机器人技术研究现状与发展趋势. 中国科学: 信息科学, 2012, 42(9): 1049—1066.
- [20] Aksoy E E, Abramov A, Dorr J, et al. Learning the semantics of object—action relations by observation, The International Journal of Robotics Research, 2011, 30(10): 1229—1249.
- [21] He J, Zhang D, Jiang N, Farina D, Zhu X. User adaptation in long-term, open-loop myoelectric training: Implications for EMG pattern recognition in prosthesis control. Journal of Neural Engineering, 2015, 12(4): 046005.
- [22] Gao X, Xu D, Cheng M, Gao S. A BCI-based environmental controller for the motion-disabled. IEEE Transaction on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 2003, 11: 137—140.
- [23] Japan Society of Mechanical Engineers. Roadmap of industrial robot technology. <http://www.jsme.or.jp/English/>
- [24] Mishra S, Topcu U, Tomizuka M. Optimization-based constrained iterative learning control, IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2011, 19(6): 1613—1621.
- [25] Tahara K, Kino H. Iterative, learning control for a redundant musculoskeletal arm: acquisition of adequate internal force, The 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, October 18—22, Taipei, Taiwan, 2010.
- [26] 张佳帆. 基于柔性外骨骼人机智能系统基础理论及应用技术研究. 博士学位论文, 杭州: 浙江大学, 2009.
- [27] Ensuring American Leadership in Advanced Manufacturing: Report of the President's Council of Advisors on Science and Technology (PCAST) <https://www.whitehouse.gov/administration/eop/ostp/pressroom/06242011>.
- [28] 王天然. 人机共融机器人技术与系统(会议报告). 国家自然科学基金委员会第121期双清论坛, 2014. 10.

Research trend and scientific challenge of robotics

Liu Xinjun¹ Yu Jingjun² Wang Guobiao³ Lai Yanan³ He Baiyan³

(1. Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084;

2. Robotics Institute, Beihang University, Beijing 100191;

3. Department of Engineering and Materials Sciences, National Natural Science Foundation of China Beijing 100085)

Abstract Basic theory and key technology of robotics, involved with various disciplines, is one of the hottest research issues, and it has been enrolled into the national strategic plans by such countries as the USA, European alliances, Japan and South Korea et al. Focusing on this theme, and on the basis of outputs from 121th and 146th Shuang Qing Forum of National Natural Science Foundation of China this paper discussed the research hotspots and developing trend in the aspects of architectures, perception and controls. It is concluded that fri-co(coexisting-cooperative-cognitive) robots will become the main current of the new-generation robots study. Correspondingly, some challenging issues in the basic theory and key technology of human-fusion robots are pointed out. Finally, some key directions in the coming 5~8 years have been proposed.

Key words robot; cooperation; natural interaction; intelligence