

智能机器人研究现状及发展趋势的思考与建议^①

陶 永^② 王田苗 刘 辉 江 山

(北京航空航天大学机械工程及自动化学院 北京 100191)

(北京航空航天大学生物医学工程高精尖创新中心 北京 100083)

摘 要 随着工业化进程的推进和信息化时代的到来,智能机器人在智能制造、智能交通自动化、物联网、医疗健康与智能服务等方面扮演越来越重要的角色。本文结合作者在智能机器人领域的相关工作,分析国内外智能机器人发展研究的基础上,就目前人机协作、无人驾驶、情感识别、脑机接口、仿生软体机器人和云平台、大数据网络等关键与前沿技术的研究作简要的综述,概要展望了其发展趋势并提出关于我国智能机器人发展的思考与建议。希望能够在把握国内外智能机器人前沿技术发展的同时,为发展我国智能机器人技术与产业提供相关理论、方法及技术方面的参考与借鉴。

关键词 智能机器人, 人机协作, 无人驾驶技术, 情感识别, 脑机接口, 大数据网络

0 引 言

2015 年,被誉为智能机器人元年。随着人工智能时代开启,机器人、信息、通信、人工智能进一步融合,历经电气时代、数字时代,机器人将进入智能时代。在技术上,机器人技术从控制器、伺服电机、减速器等传统的工业技术向计算机视觉、自然语言处理、深度学习等人工智能技术演进;在应用上,机器人从工业用户向商用、家庭、个人等领域逐步推广,将更加深入地融入人类社会;在人机交互方面,人类和机器人由相互隔离、互不干预发展到充分的人机协作、交互融合^[1]。

国际标准化组织对机器人的定义为:“机器人是一种自动的、位置可控的、具有编程能力的多功能机械手,这种机械手有几个轴,能够借助于可编程序操作来处理各种材料、零件、工具和专用装置,以执行各种任务”^[2]。智能机器人是在传统机器人的基

础上,在感知、决策、效应等方面进行了全面提升,并且在行为、情感和思维上模拟人的机器系统。它们具有相当发达的“大脑”,既可听从人类的指令,按照程序运行完成任务,又可与人类友好地交互,并在交互过程中不断学习和改进。智能机器人从应用环境的角度划分为工业机器人和服务机器人两大类。

工业机器人是面向工业领域的多关节机械手或多自由度机器人,是自动执行工作的机器装置,是靠自身动力和控制能力实现各种功能的一种机器。它接受人类指令后,将按照设定的程序执行运动路径和作业,包括焊接、喷涂、组装、采集、放置、产品检测和测试等^[3]。根据国际机器人联合会(International Federation of Robotics, IFR)的定义,服务机器人是一种半自主或全自主工作的机器人(不包括从事生产的设备),它能完成有益于人类的服务工作。服务机器人又可分为两类:专用服务机器人和家用服务机器人。其中,专用服务机器人是在特殊环境下作业的机器人,如水下作业机器人、空间探测机器人、

① 工信部 2016 年智能制造新模式应用项目资助。
② 男,1979 年生,博士,副研究员;研究方向:智能机器人先进控制技术与集成应用,嵌入式机电一体化控制;联系人,E-mail: taoy@buaa.edu.cn (收稿日期:2018-07-02)

抢险救援机器人、反恐防爆机器人、军用机器人、农业机器人、医疗机器人及其他特殊用途机器人;家用服务机器人是服务于人的机器人,如助老助残机器人、康复机器人、清洁机器人、护理机器人、教育娱乐机器人等^[4]。

习近平总书记提到:“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。”智能机器人技术是多学科交叉与融合的结晶。大数据、人工智能和传感器技术的日渐成熟,推动机器人逐步完成从传统工业机器人到具有感知、分析、学习和决策能力的智能机器人的转变。智能机器人可处理大量的信息,完成更加复杂的任务,在工业、农业、交通、医疗、教育、娱乐、航天和军事上将发挥越来越重要的作用。

如今我国劳动力成本快速上涨,人口红利逐渐消失^[5],生产方式向柔性、智能、精细转变,构建以智能制造为核心的新型制造体系迫在眉睫,对具有更高智能化的工业机器人的需求将呈现井喷式增长的趋势^[6]。另一方面,我国正在步入老龄化社会,社会服务成本增加,随之出现的助老陪护、医疗健康服务的需求十分旺盛,智能服务机器人的发展与推广将会在很大程度上填补专业服务人员的缺失,使人们的生活更加便利。此外,国防军事、未知探索和公共安全等领域将持续在智能机器人的开发应用方面进行大量投入,让机器人代替人类完成恶劣环境下的高风险任务。

综上所述,智能机器人产业的发展前景十分广阔,市场潜力巨大。智能机器人的应用推广,将极大地解放社会劳动力,更加高效和便捷地完成繁重的重复性工作、基础服务性工作和高风险性工作。在为社会创造巨大经济效益的同时,也将有效改善民生问题。将智能机器人技术作为战略意义上的高科技,对其进行重点发展具有十分重要的意义。

1 国内外智能机器人现状

1.1 国内外智能机器人发展计划

机器人技术是综合了机械电子、自动化控制、传

感器技术、计算机技术、新型材料、仿生技术和人工智能等多领域多学科的复杂高科技技术,被认为是对未来新兴产业发展具有重要意义的高新技术之一。作为重要的技术辐射平台,它既是发展先进制造业的关键支撑,也是改善人民生活方式的重要切入点。

智能机器人产业作为衡量一个国家科技创新和高端制造业水平的重要标志,其发展越来越受到世界各国的广泛关注和高度重视。世界各大主要经济体为了抓住发展机遇,获得在以机器人为代表的高科技领域的竞争优势,纷纷将突破智能机器人技术、发展机器人产业上升为国家战略,其中以美国、欧洲、日本、韩国和中国为代表,均根据各自的生产力需求制定了机器人发展战略与计划。

(1) 美国的机器人发展计划

美国作为最早开发及推广应用机器人的国家,其智能机器人技术在国际上一直处于领先水平,近年来,美国先后制定和发布了多项与机器人发展相关的战略及计划。2011 年,美国推行“先进制造业伙伴计划”,明确提出通过发展工业机器人重振制造业,开发新一代智能机器人。同年在卡耐基梅隆大学启动“国家机器人计划”,其目标是“建立美国在下一代机器人技术及应用方面的领先地位”。2013 年发布“机器人路线图:从互联网到机器人”,将智能机器人与 20 世纪互联网定位于同等重要地位,同时强调了机器人技术在制造业和医疗健康领域的重要作用。2016 年推出了“机器人路线图”最新版本,对无人驾驶、人机交互、陪护教育等方面的机器人应用提出了指导意见;同年推出“国家机器人计划 2.0”,致力于打造无处不在的协作机器人,让协作机器人与人类伙伴建立共生关系。

(2) 欧洲的机器人发展计划

在欧洲,机器人技术创新一直是欧盟数字议程、第七研发框架计划和 2020 地平线项目资助的重点优先领域。英国在 2014 年推出首个官方机器人战略 RAS 2020,并投资 2.57 亿美元用于发展机器人和自主系统。2013 年,德国为保持其制造业领先地位提出的“工业 4.0 计划”,也将智能机器人和智能制造技术作为新工业革命的切入点。同年,法国推

出了《法国机器人发展计划》,计划向机器人产业投资 1.296 亿美元,旨在为机器人产业持续发展创造有利条件。2014 年欧盟启动了“欧盟机器人研发计划”,这是世界上最大的民间自助机器人创新计划,计划到 2020 年投入 28 亿欧元,集合 200 多家公司、1.2 万研发人员参与,在制造业、农业、健康、交通、安全和家庭等领域推广机器人应用。

(3) 日本的机器人发展计划

日本作为机器人第一大国,始终保持对机器人产业的高度重视,制定了机器人技术长期发展战略,同时,日本政府将机器人作为经济增长战略的重要支柱。2014 年 6 月,日本政府通过“日本振兴战略”,提出推动“机器人驱动的新工业革命”,讨论相关的技术进步、监管改革以及机器人技术的全球化标准等举措。在机器人路线中,将新世纪工业机器人列为重点发展的 3 个领域之一。2015 年发布《机器人新战略》,旨在将机器人与计算机技术、大数据、网络、人工智能等深度融合,在日本积极建立世界机器人技术创新高地,营造世界一流的机器人应用社会,引领新时代智能机器人发展。

(4) 韩国的机器人发展计划

在韩国,智能机器人被视为 21 世纪推动国家经济增长的十大“发动机产业”之一。在 2008 年 3 月制定了《智能机器人促进法》,并于 2009 年 4 月公布了《智能机器人基本计划》,逐步完成从传统造型机器人向智能服务型机器人转变。同年发布了“服务机器人产业发展战略”,目标是成为世界机器人强国。2012 年推出“机器人未来战略 2022”,计划投资 3500 亿韩元,将目前 2 万亿韩元规模机器人产业扩展 10 倍;将机器人打造为支柱性产业,重点发展救灾机器人、医疗机器人、智能工业机器人、家庭机器人等 4 大类机器人,实现 all-robot 时代愿景。韩国知识经济部于 2013 年制定了《第 2 次智能机器人行动计划(2014-2018 年)》,到 2018 年韩国机器人国内生产总值 20 万亿韩元,挺进“世界机器人三大强国行列”。

(5) 中国的机器人发展计划

自 2013 年以来,中国已成为全球最大的机器人市场,且仍具有巨大的市场潜力。为促进我国机器

人产业健康发展,工信部等部委陆续出台一系列后续产业发展促进措施。在工信部、发改委和财政部三部委联合印发的《机器人产业发展规划(2016-2020 年)》中,将智能机器人的发展应用作为重要的发展目标和主要任务,并提出“新一代机器人技术取得突破,智能机器人实现创新应用;推进工业机器人向中高端迈进;促进服务机器人向更广领域发展”。要求五年内形成我国较为完善的机器人产业体系。根据工信部的部署,下一阶段相关产业政策将着手解决两大关键问题:一是推进机器人产业迈向中高端发展;二是规范市场秩序,防止机器人产业无序发展。2016 年 12 月 29 日,工信部、发改委、国家认监委联合发布《关于促进机器人产业健康发展的通知》,旨在引导我国机器人产业协调健康发展。与此同时,工信部制订了《工业机器人行业规范条件》,以促进机器人产业规范发展。

1.2 国内外智能机器人的产业发展现状

近些年,全球机器人市场呈现持续扩张与繁荣状态,机器人的技术日趋进步与成熟。在国内外相继形成了一批具有代表性的研究院所和知名企业,在研究院所方面,例如:Massachusetts Institute of Technology (MIT) 计算机科学和智能实验室、Stanford University 人工智能实验室、Carnegie Mellon University (CMU) 机器人研究所、Georgia Institute of Technology 人机交互实验室、Waseda University 仿人机器人研究院、University of Tsukuba 智能机器人研究室、德国宇航中心机器人研究室等。国内的沈阳自动化研究所,哈尔滨工业大学机器人研究所,上海交通大学机器人研究所,中国科学院自动化研究所,北京航空航天大学机器人研究所,北京理工大学智能机器人研究所,西安交通大学人工智能与机器人研究所等。

在知名机器人企业方面,包括工业机器人 4 大家族的瑞士 ABB 公司、德国 KUKA 公司、日本 Yaskawa Electric 公司和 FANUC 公司,还有美国 Northrop Grumman 公司、美国 iRobot 公司、美国 Intuitive Surgical 外科手术机器人公司、英国 ABP 公司、Saab Seaeye 水下机器人公司、德国 Reis 机器人集团、加拿大 PESCO 公司、法国 Aldebaran 公司等。国

内的新松机器人自动化股份有限公司、哈尔滨博实自动化股份有限公司、南京埃斯顿自动化股份有限公司、安徽埃夫特智能装备股份有限公司、广州数控设备有限公司、大疆创新科技有限公司、纳恩博机器人公司、富士康科技集团,深圳优必选科技有限公司、康力优蓝机器人科技有限公司、穿山甲机器人有限公司、北京天智航技术有限公司、北京柏惠维康科技有限公司等。这些企业在其所在领域和地区已成为支柱性产业,在推动机器人产品的应用和市场化方面做出了不可磨灭的贡献。

随着全球机器人市场规模持续扩大,工业、特种和服务机器人等领域应用持续开拓,全球机器人产业正引来新一轮增长。据 IFR 统计,2017 年,全球机器人市场规模达到 232 亿美元,2012 - 2017 年的平均增长率接近 17%。其中,工业机器人 147 亿美元,服务机器人 29 亿美元,特种机器人 56 亿美元(图 1)。全球工业机器人销量比 2016 年增加 29%,达 380 550 台,再创历史新高;服务机器人市场规模

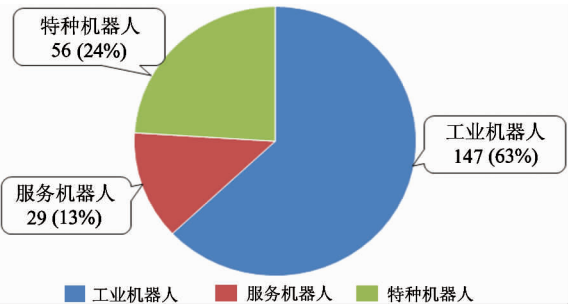


图 1 2017 年全球机器人市场规模



图 2 世界知名人机协作机器人

(2)智能服务机器人技术研究与应用现状

在智能服务机器人方面,前沿科技的领域主要有:服务机器人智能材料与新型结构、服务机器人感知与交互控制、服务机器人认知机理与情感交互、服务机器人人机协作与行为控制、云服务机器人与服务机器人遥操作等。社交智能化机器人服务平台、医用机器人服务、智能交通系统、智能感知识别、大数据与人工智能、生物材料与刚柔耦合软体机器人、

高速增长,用于专业用途的服务机器人的销售额增长 12%^[7-9]。

1.3 国内外智能机器人的技术研究现状

近年来,国内外智能机器人热门产品不断涌现。在双臂协作机器人、智能物流 AGV、无人驾驶、医疗手术及康复机器人、智能服务机器人和特种机器人等方面,国外相关的研究机构或机器人公司取得了重要突破。

(1)智能工业机器人技术研究与应用现状

在智能工业机器人方面,典型代表为具有与人协作工作的人机协作机器人(图 2)。美国 Rethink 公司推出了 Baxter 智能协作机器人,可在工厂中独立负责重复性工作,也可与工人进行同步协作,执行生产上下料、机器控制、包装和材料处理等多种任务。ABB 公司在 2015 年 4 月推出了 Yumi 双臂协作机器人,旨在满足消费电子产品行业对于柔性生产和灵活制造的需求,融合了双臂设计、多功能智能双手、基于机器视觉的部件定位、引导式编程、精密运动控制和防碰撞安全机制等技术,实现基于视觉引导式装配及力控式装配。

在国内,新松推出了柔性多关节机器人,适用于布局紧凑、精准度高的柔性化生产线。同样具有代表性的还有 Universal Robots 的 UR 系列,日本发那科公司负载最大可达 35 kg 的 CR-35iA。KUKA 推出了 LBRiiwa,并与瑞仕格联合开发了 AIP(Automated Item Pick)机器人拣选技术。

微纳制造与智能硬件等领域已成为服务机器人的热点应用领域。未来智能服务机器人及产业将向交叉融合基础技术、以服务人为核心、定制化智能制造等方向发展。当前,国外在智能算法方面和技术创新方面具有优势,而国内通过代加工进行技术积累,加上运营上的努力,取得了明显进步。在家庭服务机器人方面,机器人主要进行打扫清洁、家庭助理和生活管家的工作,目前,国内外主要有美国 iRobot 公

司的 Roomba 系列吸尘清扫机器人, Neato 公司的 XV 系列清扫机器人、国内科沃斯公司的扫地机器人和擦窗机器人等系列;此外还有 RoboDynamics 公司的 Luna, 法国蓝蛙机器人公司的 Buddy, 国内的小鱼在家公司推出的智能陪伴机器人等系列, 可完成照顾老人儿童、事件提醒和巡逻家庭的任务。

在娱乐教育机器人方面, 法国 Aldebaran Robotics 公司的教育机器人 Nao, 采用开放式编程框架, 开发者对 Nao 进行开发, 使其完成踢球、跳舞等复杂动作。随后又与软银集团合作研发了新一代“情感机器人”Pepper, 配备了语音识别和面部识别技术, 可通过识别人类的语调和面部表情, 完成与人的交流和表情变化^[10]。



图3 服务机器人活跃于家庭、商业和科研等领域

此外, 在短程代步功能机器人方面, 国内短途交通领导企业 Ninebot(纳恩博)完成对 Segway 的全资收购, 其推出的 WindRunner 系列及 Ninebot 系列无论在市场还是技术方面均处于世界领先地位。服务机器人活跃于家庭、商业和科研等领域的典型代表见图3。

(3) 医疗机器人技术研究与应用现状

在医疗外科机器人方面, 其具有出血少、精准度更高、恢复快的优势, 市场潜力巨大。1985 年 Puma 560 完成了机器人辅助定位的神经外科脑部活检手术, 这是第一次将机器人用于手术中。1997 年, 伊索(AESOP)完成了第一例腹腔镜手术, 成为 FDA 批准的第一个清创手术机器人。Intuitive Surgical 公司率先突破外科手术机器人的 3D 视觉精确定位和主从控制技术, 1999 年首次发布 da Vinci 外科手术机器人, 至今已推出第 4 代, 全球累计安装近 4 000 台, 完成手术 300 万例, 是目前世界上最成功的医疗外科机器人。

谢菲尔德机器人研究中心研制出的先进类人型机器人 iCub, 拥有触觉和手眼配合能力, 配备有复杂的运动技能和感知能力, 并可通过语言、动作以及协作能力与周围的环境交互^[11]。家庭社交型机器人 Jibo, 以类人的方式与人交流而且可为家庭拍照担当家庭助理。

在国内, 360 公司为儿童打造的 360 儿童机器人, 基于大数据搜索和语音交互功能为儿童提供拍照、儿歌和教育功能。在春晚上表演舞蹈大放光彩的 Alpha1 机器人由优必选公司推出。由北京康力优蓝开发的商用机器人“优友”, 可完成导购咨询、教学监护的任务。

此外, 以色列 Microbot Medical 公司研发推出的 ViRob, 是可远程应用电磁场控制的自动爬行微机器人, 可将摄像机、药物或器材运送到身体细窄弯曲的部位, 如血管、消化道等, 协助医生实行微创手术。

在国内, 北京航空航天大学机器人研究所联合海军总医院, 率先进行医疗脑外科机器人研究, 2003 年设计出了适合辅助脑外科手术的机器人, 目前已经完成第 5 代的研制与临床应用^[12]。2013 年, 国家“863”计划资助项目“微创腹腔镜外科手术机器人系统”, 由哈尔滨工业大学机器人研究所研制成功, 在手术机器人系统的机械设计、主从控制算法、三维腹腔镜镜与系统集成等关键技术上实现突破。2014 年 4 月, 在中南大学湘雅三医院使用由天津大学研发的具微创外科手术机器人系统“妙手 S”顺利完成了 3 例手术, 这是我国自主研发的手术机器人系统首次运用于临床^[13]。重庆金山科技(集团)有限公司专注于研发胶囊内窥镜, 新推出的 OMOM 胶囊机器人具有主动推进功能, 使医生获得更灵活的视野。北

京天智航技术有限公司是目前国内最大的骨科医疗机器人公司,推出的第一代骨科手术机器人(GD-A)于 2010 年 2 月获得了骨科机器人产品注册许可证,填补了国内相关领域的空白。

(4)特种机器人技术研究与应用现状

在特种机器人方面,特种机器人是替代人在危险、恶劣环境下作业必不可少的工具,可以辅助完成人类无法完成的作业(如空间与深海作业、精密操作、管道内作业等)的关键技术装备。美国在特种机器人方面处于世界领先地位,我国在政策鼓励下进步明显,尤其是在水下机器人方面具有突出进步。

由美国 ReconRobotics 公司推出的战术微型机器人 Recon Scout 和 Throwbot 系列具有重量轻,体积

小,无噪声和防水防尘的特点。由 Sarcos 公司最新推出的蛇形机器人 Guardian S,可在狭小空间和危险领域打前哨,并协助灾后救援和特警及拆弹部队的行动。

由斯坦福大学研究团队发明的人形机器人 OceanOne 采取 AI + 触觉反馈的协同工作方式,让机器人手部能够感受到所抓取物体的重量与质感,实现对抓取力量的精确掌控。美国波士顿动力公司致力于研发具有高机动性、灵活性和移动速度的先进机器人(图 4),先后推出了用于全地形运输物资的 BigDog,拥有超高平衡能力的双足机器人 Atlas 和具有轮腿结合形态并拥有超强弹跳力的 Handle^[14]。

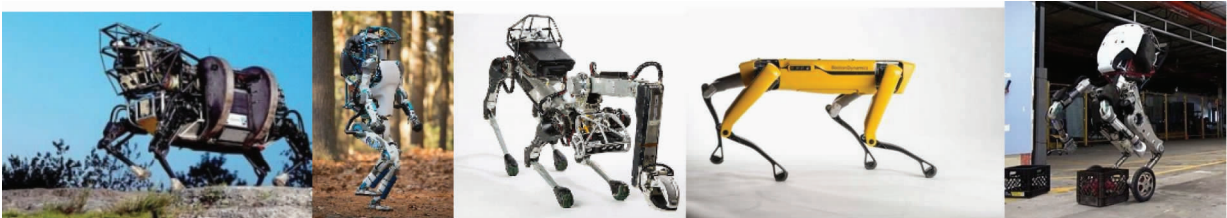


图 4 Boston 动力公司的机器人典型代表

在国内,2009 年沈阳新松机器人自动化有限公司研制了我国首台具有生命探测功能的井下探测救援机器人。此外哈工大机器人集团研制成功并推出了排爆机器人、爬壁机器人、管道检查机器人和轮式车底盘检查机器人等多款特殊应用机器人。在水下机器人方面,7 000 米级深海载人潜水器“蛟龙号”,创造了下潜 7 062 m 的世界载人深潜纪录,是目前世界上下潜能力最深的作业型载人潜水器。

在仿生机器人方面,德国的 Festo 是仿生机器人的先驱,相继推出了 AirPenguin, SmartBird, BionicOpter, BionicKangaroo, BionicANT, eMotion Butterfly 等具有代表性的机器人,推动了仿生技术的发展。2015 年,Festo 与北京航空航天大学展开合作,共同研发了软体章鱼触手机器人,引起了公众、工业、学术等各界人士的兴趣。

(5)无人驾驶技术研究与应用现状

在无人驾驶方面,根据英特尔发布的一项由 Strategy Analytics 执行的研究,该研究预测自动驾驶车辆价值在 2050 年将增加到 70 000 亿美元。此外,

安全可靠的自动驾驶技术将挽救大量驾驶人员的生命,并极大地解放人们的通勤时间,这对人类未来的出行方式有望产生极大的改变。高效可靠的算法、雄厚的工程与资金实力以及政策的支持,是对无人驾驶技术研究和推广的关键因素,三者缺一不可。

谷歌较早布局自动驾驶,于 2015 年成功实现上路测试,并成立了自动驾驶公司 Waymo,累积的行驶里程已经超过 300 万英里。电动汽车厂家特斯拉启用 Autopilot 系统,该系统中集成了雷达、多摄像头和超声波雷达传感器以及 NVIDIA 公司研发 DRIVE PX2 处理器,可实现完全自动驾驶,推广应用以来,已经积累了 1.6 亿公里以上的行驶里程。2016 年 7 月,移动出行巨头 Uber(优步)宣布以 6.8 亿美元高价收购 Otto,提供面向货运卡车的自动驾驶运营服务,全新的自动驾驶套件中加入了 64 线可旋转激光雷达(LiDAR)阵列,将车辆周围的环境通过高精度点云进行描述,提升了自动驾驶系统的数据收集和处理能力。

在国内,百度无人车计划也已执行多年,在 2016



图 5 无人驾驶技术竞争激烈,谷歌、优步、特斯拉、百度布局无人驾驶

年与北汽新能源合作开发出可达“L4 级无人驾驶”的智能汽车EU260,并推出了开源的“阿波罗计划”,宣布开放自动驾驶平台,希望解决传统汽车厂商的转型之痛。2018 年 7 月 10 日,百度公司与宝马集团合作,宝马集团加入“阿波罗计划”(图 5)。此外,滴滴出行科技有限公司、北京景驰科技有限公司、北京中科寒武纪科技有限公司、地平线机器人科技有限公司以及北京图森未来科技有限公司等众多公司和科研团队加入到了无人驾驶技术的竞争中,相信在不久的将来,具有真正完全自动驾驶功能的汽车会融入人们的生活。

(6)智能物流机器人技术与应用现状

在智能物流方面,以智能 AGV 为代表的仓储机器人在生产应用中发挥越来越大的作用。传统的 AGV 利用电磁轨道设立行进路线,根据传感器进行

避障,保障系统在不需人工引导的情况下沿预定路线自动行驶。而现代仓储机器人融合了 RFID 自动识别、激光引导、无线通信和模型特征匹配技术,使机器人更加精确地完成定位、引导和避障操作^[15]。结合大数据、物联网技术与智能算法,路径规划和群体调度的效率也大大提高。

2012 年,亚马逊(Amazon)在各个仓库大规模部署物流机器人 Kiva(图 6),可将货架从仓储区移动到拣货的仓库员工面前,工作准确率达到 99.99%,颠覆了电商物流中心作业“人找货”的传统模式,实现了“货找人”的新模式,大大降低了人力成本,提高了物流效率。根据 2013 年的报告显示,Kiva 机器人帮助亚马逊将普通订单的交付成本下降 20% 至 40%,预估每年能节约 9 亿美元左右。

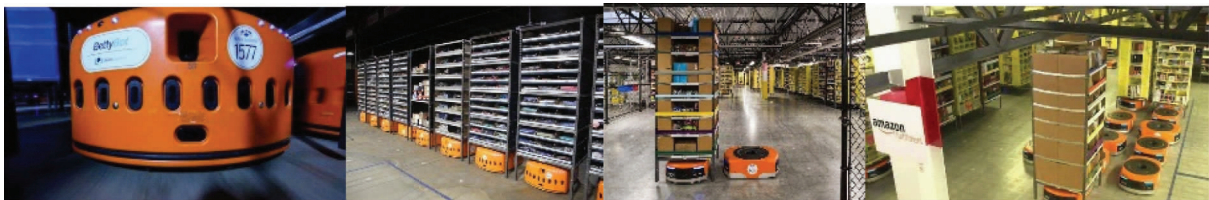


图 6 Amazon 仓库中的 Kiva 机器人正在快速搬运货物

而在国内,天猫、京东、申通等也纷纷尝试应用仓储机器人。在天津的阿里菜鸟仓库中,部署了 50 台由北京极智嘉科技有限公司开发的 Geek + 仓储机器人用于协助商品分拣工作,日出货能力超过 2 万件,节约人力 40 多。上海快仓智能科技是国内最大的仓储机器人公司之一,并与唯品会、京东等合作,推出和应用了快仓机器人系统,单仓超 100 台,日出货量达 4 ~ 5 万单,单仓最大日出货能力超过了 10 万件。在申通临沂仓库分拣区,投入了由海康机器人设计开发的“阡陌”智能仓储系统,与工业相机的快速读码技术及智能分拣系统相结合,实现 5 kg 以下得到小件快递包裹称重/读码后的快速分拣,并

根据机器人调度系统的指挥,基于二维码和惯性导航,以最优路径投递包裹,能实现每小时处理包裹 2 万单。

据 Tractica 预测,2021 年全球仓储和物流机器人市场将达到 224 亿美元,这期间是快速增长的爆发期。另外,除了在物流仓储方面的应用,亚马逊于 2016 年 12 月完成了首次商用无人机送货,而由 Yara International ASA 和 Kongsberg Gruppen 公司共同建造的世界第一艘无人货船 YaraBirkeland 计划于 2018 年推出,这艘货船使用了全球定位系统、雷达、摄像头和传感器,完成了在船只众多的海面上自主航行。从长远角度来计算,通过节省燃料和机

组人员成本,每年将节约高达 90% 的运营成本。

2 智能机器人关键及前沿技术

智能机器人的应用技术从成熟性、广泛性和迫切性等维度,分为关键技术和创新前沿技术。以上介绍的主要类型的机器人大部分已实现产业化。我国的智能机器人部分关键技术有所突破,但在整体核心技术的掌握上仍与世界先进水平存在差距。

为了提高国内品牌及产品的竞争力,建议开展关键技术的攻关研究,包括:刚柔耦合的新型仿生柔顺机构,面向人机共融的高安全决策机制,非结构环境下的基于视觉的图像理解和低成本 SLAM 技术,交通信息采集技术,多智能体系统分布式协同控制,医学虚拟现实与沉浸感人机交互,多模态医学图像配准与融合技术,可穿戴设备的人机耦合及实现技术,面向人机和谐共融的情感识别与交互机理等。开展创新前沿科技的研究对引领国家未来新兴产业的形成和发展具有重大作用,本文将着重阐述脑机接口技术、类人脑的机器人控制与决策、面向软体结构的新材料应用和基于云计算、大数据的网络决策机制等前沿技术。

2.1 智能机器人关键技术

2.1.1 人机协作与融合机器人技术

人机协作机器人在新一代智能机器人中扮演着越来越重要的角色,2016 年国际标准化组织(ISO)发布了最新的协作机器人规范^[16]。为了达到机器人与人类和谐共处的目标,新型人机协作机器人具有安全性、舒适性、适应性和易编程的特点。安全性,是指机器人与人的交互过程要确保机器人不伤害到人;舒适性,是指人机交互过程中,机器人的动作要符合人的认知习惯,人可以识别机器人的动作意图;适应性,是指机器人在交互过程中能够准确理解人的需求并主动适应人的运动,适应不同的任务需求;易编程,是指机器人要易于示教和手动编程,并且人类容易学习如何操作。

人与机器人协作交互的方式包括自然语言、视觉和触觉等,需要掌握和突破的关键技术包括:刚柔耦合的变刚度机构设计^[17-19],面向人机共融的高安

全决策机制^[20,21],三维全息环境建模^[22],高精度的触觉、力觉传感器和图像解析算法^[23-25]等。一方面要处理好、机器人与环境的和谐共融与安全共处,另一方面要兼顾对不同环境和任务的适应,达到人机高效协同协作的目标。

2.1.2 非结构环境下的机器人自主导航技术

在移动机器人领域,从生产线上搬运及装卸原材料的搬运机器人到实现自动化管理的高效运输的仓储物流机器人,再到运行在商场、展厅和家庭的各类移动服务机器人,再到万众瞩目的无人驾驶汽车,自主导航技术一直是热点研究问题。

如何在由静态障碍物和动态障碍物组成的非结构环境下实现高效安全的定位、避障及导航则是难点问题。这其中关键技术包括:低成本 SLAM 技术^[26],多传感器信息采集及融合技术,非结构环境下基于视觉的图像理解^[27]以及智能交通控制技术^[28]等。

在无人驾驶方面,由于安全性和应用推广的要求,在传感、感知及决策方面提出了更高的要求。传感方面,GPS/IMU 传感系统通过全球定位和惯性更新数据,完成无人车自我定位;激光雷达作为主传感器用于绘制地图、辅助定位及避障;摄像头被广泛使用在物体识别及物体追踪等场景中,在车道线检测、交通灯侦测、人行道检测中以摄像头为主要解决方案;雷达和声纳系统则作为避障的最后一道保障。

在感知方面,激光雷达产生点云对环境进行“形状化描述”,并通过粒子滤波关联已知地图与观测量完成准确定位,同时,立体视觉测距也用于辅助定位;根据激光及视觉的像素和深度信息,利用深度学习技术,建立大型的 CNN 神经网络并进行离线训练,用以识别和跟踪道路上的车辆、行人和树木等^[29]。

在决策方面,建立适当的概率模型预测行人与车辆的动态行为和路径规划;通过两层级的避障机制保证车辆的安全行驶,第一层级是基于交通情况预测的前瞻层,第二层为基于雷达数据的实时反应层,分别用于路径的全局与局部修正。

2.1.3 多智能体机器人系统

多智能体系统是由一定数量的自主个体通过相

互合作和自组织,在集体层面上呈现出有序的协同运动和行。这种行为可使群体系统实现一定的复杂功能,表现出明确的集体“意向”或“目的”^[30]。

多智能体系统的研究包括:如何提高系统协同控制的收敛速度,实现有限时间控制^[31];时变系统下切换拓扑结构,更加合理地描述多智能体网络^[32];全局非线性协同状态估计方案研究和利用启发式算法实现群体机器人的分布式协同控制^[33]等。

与传统的单一系统应用相比,多智能体系统不存在全局控制,而采用分布式控制策略,其协同工作能力提高了任务的执行效率,其冗余特性提高了任务应用的鲁棒性,能完成单一系统无法完成的分布式任务,此外,多智能体系统易于扩展和升级。系统中每个智能体都具有相对简单的功能及有限的信息采集、处理、通讯能力,然而经过局部个体之间的信息传递和交互作用后,整个系统往往在群体层面上表现出高效的协同合作能力及高级智能水平,从而实现单个智能体所不能完成的各种艰巨、复杂、精度要求高的任务目标^[34]。多智能体系统在多传感器协同信息处理、多机器人协作、无人飞行器编队和多机械臂操作控制等应用领域表现出越来越旺盛的生命力^[35,36]。

2.1.4 面向人机和谐共融的机器人情感识别与交互机理

情感识别与交互是利用人工智能的方法和技术赋予计算机或机器人以人类式的情感,使之具有表达、识别和理解喜怒哀乐的能力,具有模仿、延伸和扩展人的情感的能力,从而建立和谐的人机环境,并使机器人具有更高、更全面的智能^[37]。

目前,有三大问题需要攻克和解决,分别是情感计算、情感建模和情感识别技术。情感计算通过考虑各种引发和影响情绪的人类情感信息,建立起感知和识别人类情感的计算机系统;可获取的人类情感信息包括外在情感信息如声音、手势、面部表情等和内在情感信息如心跳、脉搏、呼吸和体温等。如何找到这些表达信号和情感特征的匹配关系,如何分配情感信息的权重是问题的关键^[38]。情感建模是情感仿真研究的重要一环,目前取得了初步研究进展,具有代表性的模型有反映人类情感认知、将情感

刺激分为 22 类的 OCC 情感模型^[39],融合环境数据的智能化 Agent 模型^[40],通过建立与人相似的应对策略机制指引智能体做出与人情感状态一致的行为反应的 EMA 模型和基于概率统计的 HMM 模型^[41]。在情感识别技术方面,包括基于机器视觉的面部表情识别技术,通过图像处理捕捉人类面部肌肉变化来分析人类情感及情绪^[42];语音识别及自然语言处理技术,其中创建丰富优质的情感语料数据库和关联情感与声学特征问题是研究的热点^[43];生理模式情感识别技术方面,如何实时获取丰富且稳定的生理信号,建立多模式的情感信号模型还需进一步研究和探索。通过和人机接口、人工智能推理和云计算等前沿技术相结合,其应用领域不断拓展,在未来将扮演重要角色。

2.2 智能机器人创新前沿技术

2.2.1 脑机接口技术

脑机接口指通过对神经系统电活动和特征信号的收集、识别及转化,使人脑发出的指令能够直接传递给指定的机器终端,在人与机器人的交流沟通领域有着重大创新意义和使用价值,促使人对机器人的控制和操作更为高效便捷。未来将主要应用在康复、灾害救援和娱乐体验等多个领域。

美国杜克大学研究人员在短尾猴大脑皮层运动神经控制区植入微电极阵列,对多通道脑电信号进行实时测量,并对脑电信号进行特征分析和解码,建立运动状态的预测模型,完成了基于多通道脑电信号的机械臂操作控制^[44]。Darpa 资助的功能假肢 DEKA Arm 项目中,通过建立一种神经界面,将大脑皮层神经活动翻译成可操纵辅助装置的控制信号,从而恢复瘫痪者的运动能力和独立生活能力^[45]。美国俄亥俄州立大学和凯斯西储大学的研究团队,通过在患者的大脑和身体中分别植入连接神经元的大脑运动皮层记录芯片和电极,帮助瘫痪和截肢患者将大脑指令直接传送给手臂肌肉和假肢中,使他们重新恢复行动能力^[46,47]。

随着生物信号测量和生机接口技术的进步,肌肉功能电刺激系统、植入式人工视觉系统、人工听觉系统等更先进的脑机接口装置将会在未来投入更加广阔的使用。

2.2.2 类人脑的机器人控制与决策

未来,随着机器人越来越多地参与到工业生产和社会生活中,人们对机器人执行任务的能力提出了更高的要求。由于机器人所处环境的复杂多变,充满干扰和不确定因素,任务具有高维度和非线性特点,传统的控制算法在处理这些问题时十分困难。

未来的机器人将在丰富传感器信息支持下,进行大量数据有效分类、归纳,并提取可靠有效信息,具有强大的学习能力,具体分为监督学习和无监督学习两种。其中,监督学习利用具有人工标签的样本集合训练出合理的模型参数,从而产生相应的控制决策机制;而无监督学习则在缺少先验知识的情况下从无标签的样本集合中训练出最优的控制律^[48]。

在监督学习方面,主要集中在对机器人模仿学习和从示教中学习的研究^[49,50]。Peters^[51]提出了概

率运动原语(ProMP),用概率化的模型描述运动原语,赋予了机器人适应任务变化的能力,并利用运动原语构建了机器人控制规律的紧凑表示,调整运动原语的参数能够让机器人模仿人的动作并适应不同的场景。

在无监督学习方面,主要集中在构建复杂神经网络和深度学习的研究。深度学习首次由 Hinton 等提出,其基本观点是采用神经网络模拟人类大脑特征学习过程。Levine 等人通过构建大型的 CNN 神经网络,令机器人进行无监督的自学习,在训练过程中完成特征的提取,建立机器人运动、传感器信息和任务执行状况的映射的关系,使机器人可以在无人干预的情况下学会开、关门,分拣物品的任务^[52,53](图 7)。这种无监督特性学习方法借鉴大脑多层抽象表达机制,实现初始特征深层抽象表达,同时深度学习在一定程度上解决了传统人工神经网络局部收敛和过适性问题。

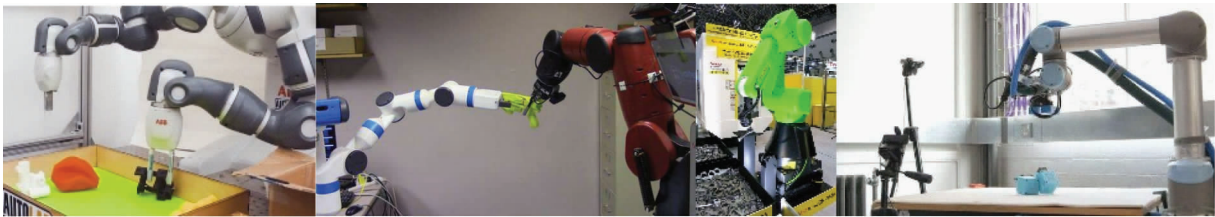


图 7 机器人应用深度学习技术学习如何成功抓取物体

2.2.3 面向软体结构的机器人新材料交叉创新与应用

传统机器人以刚性结构为主,但其结构复杂、灵活度有限、安全性和适应性较差,随着 3D 打印技术和新型智能材料的发展,采用软材料或柔性材料加工而成的软体机器人应运而生,具有可连续变形的特点,理论上具有无限自由度,在人机交互、复杂易碎物品抓取和小空间作业具有巨大优势^[54-56]。

在仿生机构方面主要有两大分支:以传统气动、线缆驱动为主的研究,如德国 Festo 的相比机器人^[57](图 8)和气动肌肉^[58];利用形状记忆合金、形状记忆聚合物、介电弹性体等智能材料,将其嵌入软体材料本体中,通过外界物理场作用产生形变来实现复杂三维运动的研究^[59],如美国 MIT 的 RUS 课题组将 SMA 编织成网状结构研发的仿生蠕虫机器人 Meshworm 和意大利仿生实验室的多臂章鱼机器人。



图 8 Festo 与北航合作研究的软体抓手

在驱动方式方面,基于流体的变压驱动具有很好的应用前景^[60];智能材料在电场、热场或磁场作用下变形,可以实现软体机器人的驱动本体一体化设计,而如何建立安全、稳定、可控的物理场是实现可靠有效驱动的关键。

此外,软体结构机器人还面临以下关键问题:可产生复杂三维腔道结构的生产工艺,如形状沉积制造(SDM)和多材料3D打印等;可嵌入式不影响本体力学特性的高精度传感器的开发,如导电液体和光导纤维等;保证本体变形能力的前提下提高强度以及实现软体机器人的可变刚度、刚柔耦合等。

3.2.4 基于云计算、大数据的机器人网络决策机制

Humanoids 2010 国际会议上,Kuffner 等^[61]首次提出“云机器人”概念。云机器人是云计算与机器人学结合,云计算是基于互联网的计算方式,共享的软硬件资源和信息可以按需求提供给网络终端。

云机器人不仅可以卸载复杂的计算任务到云端,还可以接收海量数据,并分享信息和技能,其存储、计算和学习能力更强,机器人之间共享资源更加方便,相同或相似场景下机器人负担更小,减少了开发人员重复工作时间^[62]。

需攻克和掌握的关键技术包括 Map-reduce 计算群、服务导向架构(SOA)、RaaS 模型、无线电波和微波通信技术以及 WiFi 和蓝牙通信技术等。众多科技公司如微软、谷歌、百度等纷纷投入到云计算和大数据的研究中,目前提出了各种云机器人服务平台,如基于网络机器人的云服务平台 ROS 平台^[63]、RoboEarth 平台,基于传感器网络的云服务平台如 Sensor-cloud^[64]和 X-sensor,基于 RSNP 模型的云服务平台如 Jeeves 框架^[65]。

云计算和大数据的发展,将对机器人领域如 SLAM、物品抓取和情感理解等方面起到重大推动作用。新加坡 ASORO 实验室已经建立了一个云计算架构,可让机器人构建当前环境的 3D 地图,构建速度远大于机器人机载电脑的速度^[66]。加州大学伯克利分校的 Kehoe 等人^[67]基于云平台,利用 Willow Garage 公司的 PR2 机器人和谷歌目标识别引擎完成了 3D 机器人抓取任务。微软在 Build 大会上推出的虚拟个人助理 Cortana 依赖于云端架构。谷歌

旗下的 deepmind 团队开发并开源了 AlphaGo 围棋人工智能系统,打败了全球多名顶级围棋高手^[68]。

由云计算和大数据支撑的云机器人会凭借其独有优势,在智能机器人领域引起新变革。

3 智能机器人未来展望与思考

随着产业革命的推进、社会需求的变化和技术的进步,全球机器人产业呈现全面爆发的发展态势,世界各国纷纷推出机器人发展战略,以云计算、大数据、移动和社交为代表的第三平台技术带动全球机器人产业向智能化、创新化和数字化迅速迈进。

在机器人产业转型过程中,智能机器人扮演双重角色,一方面作为传统制造业的代表进行转型升级,另一方面作为创新加速器在转型过程中起到重要的催化和推动作用。

新一代智能机器人将具备互联互通、虚实一体、软件定义和人机融合的特征,具体为:通过多种传感器设备采集各类数据,快速上传云端并进行初级处理,实现信息共享;虚拟信号与实体设备的深度融合,实现数据收集、处理、分析、反馈、执行的流程闭环,实现“实-虚-实”的转换;对海量数据进行分析运算的智能算法依托优秀的软件应用,新一代智能机器人将向软件主导、内容为王、平台化、API 中心化方向发展;通过深度学习技术实现人机音像交互,乃至机器人对人的心理认知和情感交流。

我国是世界第一大机器人市场,随着国家战略的推进和产业链的发展,大量的组织和个人参与到机器人研发与产业中,形成了“政、产、学、研、用、资”多方共建的发展格局,为机器人的生态化发展奠定了良好基础。智能机器人产业逐步规模化、体系化,基本建立完整的机器人产业链,技术创新成果显著,智能机器人市场迎来重大发展机遇。然而,智能机器人在未来发展中同样面临众多挑战,包括关键及前沿技术的突破、应用的创新与推广、资源的整合与协同等。

在关键及前沿技术方面,现有产品的智能化程度不足,功能相对简单单调,在复杂场景下的人机交互体验效果不佳,难以匹配用户需求,急需突破技术

瓶颈,实现内生增长。首先,在人机协作领域,机器人需要通过加快多模态感知、环境建模、优化决策等关键技术研发,强化人机交互体验与人机协作效能。其次,加强机器人技术与正在飞速发展的物联网、云计算、大数据技术进行深度融合,充分利用海量共享数据、计算资源,实现智能机器人产品服务化能力延伸。另外,需要进一步利用图像识别、情感交互、深度学习、类脑智能等人工智能技术,打造具有高智能决策能力和内涵、灵巧精细和安全可靠的智能机器人。面对上述技术瓶颈,如何充分运用产业链协同研发、开源机器人操作系统、跨领域融合等开放式创新方法,成为推进机器人技术突破过程中面临的新挑战。

在应用推广方面,有效的刚需尚待形成,需要把握市场动向推陈出新。随着机器人企业扩大应用场景,用户的需求变得更加多元和复杂,而商业和个人用户对机器人产品的反馈尚未形成有效渠道,对相关行业的深度知识的缺乏和对用户需求的理解不够透彻,增加了产品和需求之间匹配的难度。此外,用户越来越追求产品的个性化、创新化、多样化和快速化。需要通过对技术和产品的持续研发和投产反馈,降低机器人的生产成本和价格壁垒,形成丰富的产品线,并加大在外型设计上的投入,从而增加对广大新用户的吸引力。

最后,智能机器人概念被过度炒作,投资人希望快速实现商业变现,容易陷入急功近利的误区,进而影响从业者中长期的经验积累、需求探索和市场深耕。因此,把握市场动向,切实理解用户关键需求,立足长远,推出符合场景的创新应用成为目前智能机器人产业面临的重要挑战。

在资源方面,我国机器人产业整体处于起步期,越来越多的行业用户、信息通信技术企业和初创公司参与机器人产业,增加了机器人生态系统的复杂程度。而各参与方发展良莠不齐,对机器人利益诉求不尽相同,相互间联系不够紧密,同时,在资金、生产能力、市场经验、核心零部件供应等方面存在各式各样的问题,产业链各主体间的协同整合存在较大障碍。政府与新兴企业间的沟通机制仍需完善;科研院校的研究成果与企业产品的开发需求呈割裂状

态,科技成果转化率不高;个人和商业用户在产业链中的参与程度低,缺乏与需求深入结合的定制方案;投资者缺乏对前沿技术的关注,造成资本与基础研究的脱节。如何打造开放高效的协同体系,合理高效地分配及利用优秀资源,进一步完善生态化发展格局是我国机器人产业面临的又一挑战。

4 结 论

随着智能硬件和人工智能技术的发展,智能机器人取得了显著的进步,在协作机器人、物流、无人驾驶、医疗、教育、娱乐等方面有了越来越多的应用。用户需求的多样化和新技术的日益突起推动机器人向高度智能化、高适应性和网络化的方向快速发展,智能机器人时代已经到来。我国作为世界机器人第一大市场,将迎来巨大的发展机遇和挑战。目前,我国的智能机器人发展仍与世界先进水平存在一定差距,需认清形势、明确发展目标,制定符合我国国情的发展战略与政策,攻克核心零部件、新型传感器、人机交互、人工智能等关键技术,把握市场动向,建立有效的监管和安全机制,顺利完成智能机器人的转型和升级。相信经过政府的重视和投入,科技工作者的不懈奋斗,在不久的将来会实现“机器人走进千家万户”的美好愿景。

致谢:该论文得到科技部高技术发展研究中心刘进长研究员,我国机器人领域专家王天然、张钹、蔡鹤皋、丁汉、席宁、李泽湘、赵杰、谭民、黄田、黄强、孙立宁、王耀南、刘成良、金亚萍、韩建达、曲道奎、徐方、刘景泰、侯增广、熊蔡华、方勇纯、段星光、陈殿生、熊蓉、欧勇盛等同行提供帮助与建议,在此,作者表示深深的敬意。

参考文献

- [1] Wang T M, Tao Y, Liu H. Current researches and future development trend of intelligent robot: a review[J]. *International Journal of Automation & Computing*, 2018 (9):1-22
- [2] International Federation of Robotics. Industrial robotics standardization[EB/OL]. [http://www. ifr. org/news/ifr-press-release/iso-robotics-standardisation-35/](http://www.ifr.org/news/ifr-press-release/iso-robotics-standardisation-35/); IFR, 2018

- [3] International Federation of Robotics. Industrial robot as defined by ISO 8373 [EB/OL]. <http://www.ifr.org/industrial-robots>:IFR, 2018
- [4] International Federation of Robotics. Service robots[EB/OL]. <http://www.ifr.org/service-robot/>:IFR, 2018
- [5] 王伟同. 中国人口红利的经济增长“尾效”研究——兼论刘易斯拐点后的中国经济[J]. 财贸经济, 2012(11):14-20
- [6] 鲁棒. 2011 年全球机器人市场进入快车道[J]. 机器人技术与应用, 2012(4):10-11
- [7] DIE 智库. 2017 年机器人产业数据概览[EB/OL]. http://www.sohu.com/a/217838008_765932: sohu, 2018
- [8] 工业机器人之家. 2017 年全球工业机器人市场分析报告 [EB/OL]. <http://mini.eastday.com/mobile/171124104639463.html>: 东方网, 2017
- [9] Lan Z C. 政务服务机器人发展现状调查: 一体化解决方案是大势所趋 [EB/OL]. <https://blog.csdn.net/lanzichen/article/details/80938376>: lanzichen, 2018
- [10] Tanaka F, Isshiki K, Takahashi F, et al. Pepper learns together with children; Development of an educational application. In: Proceedings of the IEEE-RAS 15th International Conference on Humanoid Robots, Seoul, Korea, 2015. 270-275
- [11] Metta G, Sandini G, Vernon D, et al. The iCub humanoid robot: an open platform for research in embodied cognition[C]. In: Proceedings of the Workshop on Performance Metrics for Intelligent Systems, Gaithersburg, USA, 2008. 50-56
- [12] Tian Z M, Lu W S, Wang T M. Application of a robotic telemanipulation system in stereotactic surgery[J]. *Stereotact Funct Neurosurg*, 2008, 86: 54-61
- [13] 王树新, 王晓菲, 张建勋, 等. 辅助腹腔微创手术的新型机器人“妙手 A”[J]. 机器人技术与应用, 2011(4): 17-21
- [14] Kuindersma S, Deits R, Fallon M, et al. Optimization-based locomotion planning, estimation, and control design for the atlas humanoid robot[J]. *Autonomous Robots*, 2016, 40(3):429-455
- [15] 林兆花, 徐天亮. 机器人技术在物流业中的应用[J]. 物流技术, 2012, 31(13):42-45
- [16] International Organization for Standardization. 15066 Robots and robotic devices: Collaborative robots[S]. International Organization for Standardization, 2016
- [17] Wolf S, Hirzinger G. A new variable stiffness design: Matching requirements of the next robot generation[C]. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Pasadena, USA, 2008. 1741-1746
- [18] Choi J, Hong S, Lee W, et al. A robot joint with variable stiffness using leaf springs[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2011, 27(2):229-238
- [19] Wolf S, Eiberger O, Hirzinger G. The DLR FSJ: energy based design of a variable stiffness joint[C]. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Shanghai, China, 2011. 5082-5089
- [20] Zanchettin A M, Ceriani N M, Rocco P, et al. Safety in human-robot collaborative manufacturing environments: Metrics and control[J]. *IEEE Transactions on Automation Science & Engineering*, 2015, 13(2):882-893
- [21] Zinn M, Khatib O, Roth B. A new actuation approach for human friendly robot design[C]. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, New Orleans, USA, 2004. 249-254
- [22] Gutmann J S, Fukuchi M, Fujita M. 3D perception and environment map generation for humanoid robot navigation [J]. *International Journal of Robotics Research*, 2008, 27(27):1117-1134
- [23] Schmitz A, Maiolino P, Maggiali M, et al. Methods and technologies for the implementation of large-scale robot tactile sensors [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2011, 27(3):389-400
- [24] Fanaei A, Farrokhi M. Robust adaptive neuro-fuzzy controller for hybrid position/force control of robot manipulators in contact with unknown environment[J]. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 2006, 17(17):125-144
- [25] Masuta H, Kubota N. Information reduction for environment perception of an intelligent robot arm equipped with a 3D range camera[C]. In: Proceedings of IEEE Sice Conference, Taipei, China, 2010. 392-397
- [26] Davison A J, Reid I D, Molton N D, et al. MonoSLAM: real-time single camera SLAM[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 2007, 29(6): 1052
- [27] Blösch M, Weiss S, Scaramuzza D, et al. Vision based MAV navigation in unknown and unstructured environments[C]. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Anchorage, USA, 2010. 21-28
- [28] 刘智勇. 智能交通控制理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2003
- [29] Bojarski M, Del Testa D, Dworakowski D, et al. End to end learning for self-driving cars[J]. 2016, arXiv:1604.07316
- [30] Olfati-Saber R, Fax J A, Murray R M. Consensus and cooperation in networked multi-agent systems[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2007, 95(1):215-233

- [31] Shi G, Johansson K H. Multi-agent robust consensus; convergence analysis [C]. In: Proceedings of the IEEE Decision and Control and European Control Conference, Orlando, USA, 2011. 5744-5749
- [32] Sun Y G, Wang L, Xie G. Average consensus in networks of dynamic agents with switching topologies and multiple time-varying delays [J]. *Systems & Control Letters*, 2008, 57(2):175-183
- [33] Brambilla M, Ferrante E, Birattari M, et al. Swarm robotics; a review from the swarm engineering perspective [J]. *Swarm Intelligence*, 2013, 7(1):1-41
- [34] 薛宏伟, 叶媛媛, 沈林成, 等. 多智能体系统体系结构及协调机制研究综述 [J]. 机器人, 2001, 23(1):85-90
- [35] Flint M, Polycarpou M, Fernandez-Gaucherand E. Cooperative control for multiple autonomous UAV's searching for targets [C]. In: Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control, Las Vegas, USA, 2003. 2823-2828
- [36] Hafez A T, Marasco A J, Givigi S N, et al. Solving multi-UAV dynamic encirclement via model predictive control [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2015, 23(6):2251-2265
- [37] 张颖, 罗森林. 情感建模与情感识别 [J]. 计算机工程与应用, 2003, 39(33):98-102
- [38] Cambria E. Affective computing and sentiment analysis [J]. *IEEE Intelligent Systems*, 2016, 31(2):102-107
- [39] Bartels A, Zeki S. The neural correlates of maternal and romantic love [J]. *Neuroimage*, 2004, 21(3):1155-1166
- [40] Lin J, Yu H, Miao C, et al. An affective agent for studying composite emotions [C]. In: Proceedings of the International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems, Istanbul, Turkey, 2015. 1947-1948
- [41] Zeng Z, Tu J, Pianfetti B M, et al. Audio-visual affective expression recognition through multistream fused HMM [J]. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2008, 10(4):570-577
- [42] Happy S L, Routray A. Automatic facial expression recognition using features of salient facial patches [J]. *IEEE Transactions on Affective Computing*, 2015, 6(1):1-12
- [43] Zeng Z, Pantic M, Roisman G I, et al. A survey of affect recognition methods; audio, visual, and spontaneous expressions [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 2009, 31(1):39-58
- [44] Dobson J. Remote control of cellular behaviour with magnetic nanoparticles [J]. *Nature Nanotechnology*, 2008, 3(3):139
- [45] Hochberg L R, Bacher D, Jarosiewicz B, et al. Reach and grasp by people with tetraplegia using a neurally controlled robotic arm. [J]. *Nature*, 2013, 485(7398):372
- [46] Vansteensel M J, Pels E G M, Bleichner M G, et al. Fully implanted brain; computer interface in a locked-in patient with ALS [J]. *New England Journal of Medicine*, 2016, 375(21):2060
- [47] Ajiboye A B, Willett F R, Young D R, et al. Restoration of reaching and grasping movements through brain-controlled muscle stimulation in a person with tetraplegia: a proof-of-concept demonstration [J]. *Lancet*, 2017: S0140673617306013
- [48] Zhu X, Goldberg A B, Brachman R, et al. Introduction to Semi-supervised Learning [M]. Morgan and Claypool Publishers, 2006. 130
- [49] Englert P, Paraschos A, Deisenroth M P, et al. Probabilistic model-based imitation learning [J]. *Adaptive Behavior*, 2013, 21(5):388-403
- [50] Argall B D, Chernova S, Veloso M, et al. A survey of robot learning from demonstration [J]. *Robotics & Autonomous Systems*, 2009, 57(5):469-483
- [51] Peters J. Probabilistic model-based imitation learning [J]. *Adaptive Behavior*, 2013, 21(5):388-403
- [52] Levine S, Pastor P, Krizhevsky A, et al. Learning hand-eye coordination for robotic grasping with deep learning and large-scale data collection [J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2017. doi: 10.1177/0278364917710318
- [53] Finn C, Levine S. Deep visual foresight for planning robot motion [J]. 2016, arXiv:1610.00696
- [54] Ranzani T, Gerboni G, Cianchetti M, et al. A bioinspired soft manipulator for minimally invasive surgery [J]. *Bioinspiration&Biomimetics*, 2015, 10(3):035008
- [55] Luo M, Tao W, Chen F, et al. Design improvements and dynamic characterization on fluidic elastomer actuators for a soft robotic snake [C]. In: Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Technologies for Practical Robot Applications (TePRA), Woburn, USA, 2014. 1-6
- [56] Deimel R, Brock O. A Novel Type of Compliant and Underactuated Robotic Hand for Dexterous Grasping [M]. Sage Publications, Inc. 2016
- [57] Rolf M, Steil J J. Constant curvature continuum kinematics as fast approximate model for the bionic handling assistant [C]. In: Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Vilamoura, Portugal, 2012. 3440-3446
- [58] Lei J, Yu H, Wang T. Dynamic bending of bionic flexi-

- ble body driven by pneumatic artificial muscles (PAMs) for spinning gait of quadruped robot[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 29(1):11-20
- [59] Laschi C, Cianchetti M, Mazzolai B, et al. Soft robot arm inspired by the octopus [J]. *Advanced Robotics*, 2012, 26(7):709-727
- [60] Aukes D M, Heyneman B, Ulmen J, et al. Design and testing of a selectively compliant underactuated hand[J]. *International Journal of Robotics Research*, 2016, 33(5):721-735
- [61] Kuffner J J, Lavalle S M. Space-filling trees: A new perspective on incremental search for motion planning[C]. In: Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, San Francisco, USA, 2011. 2199-2206
- [62] 田国会, 许亚雄. 云机器人:概念、架构与关键技术研究综述[J]. *山东大学学报(工学版)*, 2014, 44(6):47-54
- [63] Quigley M, Conley K, Gerkey B P, et al. ROS: an open-source robot operating system[C]. In: Proceedings of the ICRA Workshop on Open Source Software, Kobe, Japan, 2009. 1-6
- [64] Yuriyama M, Kushida T. Sensor-cloud infrastructure: physical sensor management with virtualized sensors on cloud computing[C]. In: Proceedings of the International Conference on Network-based Information Systems, Takayama, Japan, 2010. 1-8
- [65] Nakagawa S, Igarashi N, Tsuchiya Y, et al. An implementation of a distributed service framework for cloud-based robot services [C]. In: Proceedings of Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Montreal, Canada, 2012. 4148-4153
- [66] Turnbull L, Samanta B. Cloud robotics: Formation control of a multi robot system utilizing cloud infrastructure [C]. In: Proceedings of the Southeastcon, Jacksonville, USA, 2013. 1-4
- [67] Kehoe B, Matsukawa A, Candido S, et al. Cloud-based robot grasping with the google object recognition engine [C]. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Karlsruhe, Germany, 2013. 4263-4270
- [68] Silver D, Huang A, Maddison C J, et al. Mastering the game of Go with deep neural networks and tree search [J]. *Nature*, 2016, 529(7587):484-489

Insights and suggestions on the current situation and development trend of intelligent robots

Tao Yong, Wang Tianmiao, Liu Hui, Jiang Shan

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191)

(Beijing Advanced Innovation Center for Biomedical Engineering, Beihang University, Beijing 100083)

Abstract

With the advancing of industrialization and the advent of the information age, intelligent robots play an increasingly important role in intelligent manufacturing, intelligent transportation system, Internet of things, medical health and intelligent services. Based on working experiences and reviews on intelligent robot studies both in China and abroad, the authors summarize researches on key and leading technologies related to human-robot collaboration, driverless technology, emotion recognition, brain-computer interface, bionic software robot and cloud platform, big data network, etc. The development trend of intelligent robot is discussed, and some insights and suggestions on intelligent robot development in China are proposed. The review is not only aimed to overview leading technologies of intelligent robot all over the world, but also provide related theories, methods and technical guidance to the technological and industrial development of intelligent robot in China.

Key words: intelligent robot, human-robot collaboration, driverless technology, emotion recognition, brain-computer interface, big data network