

发展服务机器人,助力智能社会发展

陶永

北京航空航天大学航空科学与技术国家实验室(筹),中国航空工程科技发展战略研究院,北京 100191

随着移动互联网、大数据、云计算、人工智能、智能感知、微纳制造、生物材料等新兴技术的快速发展,信息时代带来的革命正在改变人们的衣食住行,智能社会给人们工作生活带来的深远变革逐渐显现。智能服务机器人将成为人一生中成长、工作、生活、养老的重要助手,有望在未来智能生活中发挥不可替代的作用。本文从服务机器人的国际前沿与发展趋势出发,介绍服务机器人在智能社会中的重点方向以及对未来生活模式的影响,阐述家用服务机器人和医疗康复机器人在智能社会的应用形态及若干关键技术,对服务机器人助力智能社会发展提出建议。

国家副主席李源潮在2015世界机器人大会开幕式上的致辞中指出:“信息化与工业化深度融合,智能社会初露端倪。机器人技术是智能社会创新发展的风向标。”中国科协党组书记尚勇提到:“迎接即将到来的智能社会:以新型广义互联网为核心,构成智能社会发展的公共基础设施。以机器人技术为代表的信息、制造、能源、材料、认知等科技的融合汇聚创新,正启动一场新的变革浪潮。服务型机器人发展我们与世界各国处在同一起跑线上。”^[1]

近年来,随着计算机与网络技术的发展,信息时代带来的革命正在极大的改变人们的衣食住行,而移动互联网、大数据、云计算、人工智能等新兴技术给人们工作生活带来的深远变革才刚刚显现^[2]。移动互联网的发展,让大数据的采集变得容易;基于大数据采取的高度拟人化系统或生态技术,实现的人工智能,将有可能表现得“比人更人化”;云计算为人们提供智能化的服务器与系统服务。

智能生活的最终目的就是让人们能够享受到舒适、方便、快捷、安全的生活,并且生活的方式更加环保^[3]。其中,各种智能服务机器人,将成为人一生中

成长、工作、生活、养老的重要助手,有望在未来智能生活中发挥不可替代的作用。

1 服务机器人的国际前沿与发展趋势

智能感知识别、大数据与人工智能在服务机器人中的应用,促使机器人的感知识别能力逐渐接近于人或生物,微软、谷歌、百度等已经在人工智能领域有所布局。如图1所示,美国国防

部DARPA实验室开发了仿人类大脑(True North),模拟人类大脑,使机器人更加智能化;MIT人工智能实验室的智能空间通过观察人的姿态并通过接受人的语音命令指导房间控制系统为用户提供服务;2014年,微软在Build大会上推出了虚拟个人助理Cortana,其思考能力足以支持整个对话过程;谷歌在2014年4月发布的DeepMind软件通过自己的本能来控制一款叫Atari的电子游戏并取得了胜利;百度深度学习研究

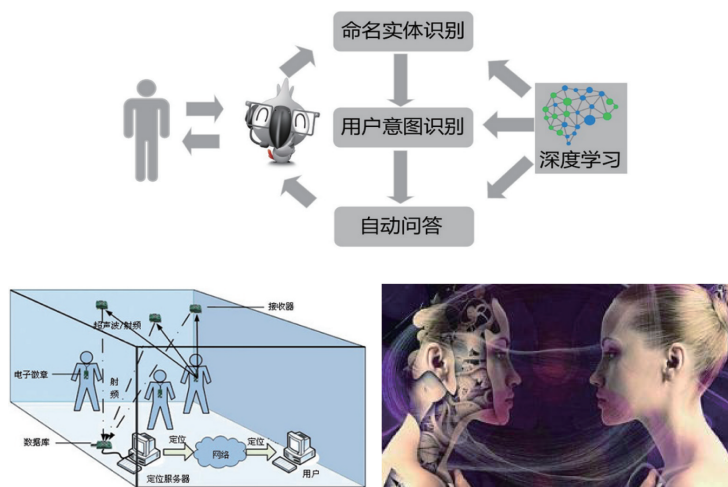


图1 智能感知识别、大数据与人工智能在服务机器人中的应用



院(IDL)开发的“百度大脑”已经能达到2~3岁孩童的智力水平。

家用服务机器人方面,多功能家庭服务机器人将给人们带来的便利性和舒适性^[4-6]。美国iRobot公司的Roomba清洁机器人,其AWARE智能系统能够让机器人从多个传感器中获取环境信息,并依次决定如何移动;不但根据需要定时清洁,还能在耗尽电能之前自主充电,然后接着自动投入清洁工作中。

医疗康复服务机器人将进一步实用化,在临床、康复、家庭等领域推广和普及。智能化也已成为人类健康及健康工程的重要需求,将为健康管理提供新维度上的信息,无线互连将改变原有的医疗模式。新型家用医疗器械的发展将会促进健康管理模式的模式;新型家用医疗器械可以实现检测的即时化、日常化、非侵入,有效地分析健康趋势、监测疾病进程,进而实现早期治疗、个

性化治疗等;无线互连将在健康状态监测、远程即时诊断、个人健康信息即时查阅等方面获得广泛应用,健康管理将在无线互连的技术支撑下实现无时不在、无处不在,实现云健康管理。如图2所示,美国Intuitive Surgical公司研制的da Vinci外科手术机器人,率先突破外科手术机器人3D视觉精确定位及多自由度末端操作手结构设计与精确控制问题,可帮助医生实现精准的手术,高可靠,高效率;以色列埃格医学技术公司研发的外骨骼机器人,将帮助瘫痪病人摆脱轮椅,像正常人一样行走,它可以感应截瘫患者细微动作及重心位置的变化,协助他们站立、步行甚至爬楼梯^[7,8]。

在美国和欧洲,服务机器人研究人员致力于改进机器人智能化水平,如图3所示,美国MIT研制的Alphadog,法国的NAO人形机器人等;在日本和韩国,

研究的服务机器人旨在用于参与人们日常生活,如日本的ASIMO仿人机器人、韩国的引路机器人,其中由MIT人员成立的波士顿动力公司率先突破四足机器人复杂动力学建模、控制与驱动问题,其研制出一款四足机器人AlphaDog可以搬运重180 kg的物品,同时还可以利用感应器朝着指定地点前进,在没有燃料补给的情况下可步行约32 km。

国内服务机器人起步较晚,但智能机器人发展势头良好,尤其是以服务机器人为代表的新兴智能科技成果已进入广泛的实际应用。如图4所示,海尔于2015年发布首款家庭服务机器人,阿里巴巴投资Pepper机器人,百度、腾讯为机器人开放互联网服务,万科“未来三成物管人员是机器人”,华为、中兴均布局服务机器人产业。



图2 医疗康复机器人得到越来越多的应用

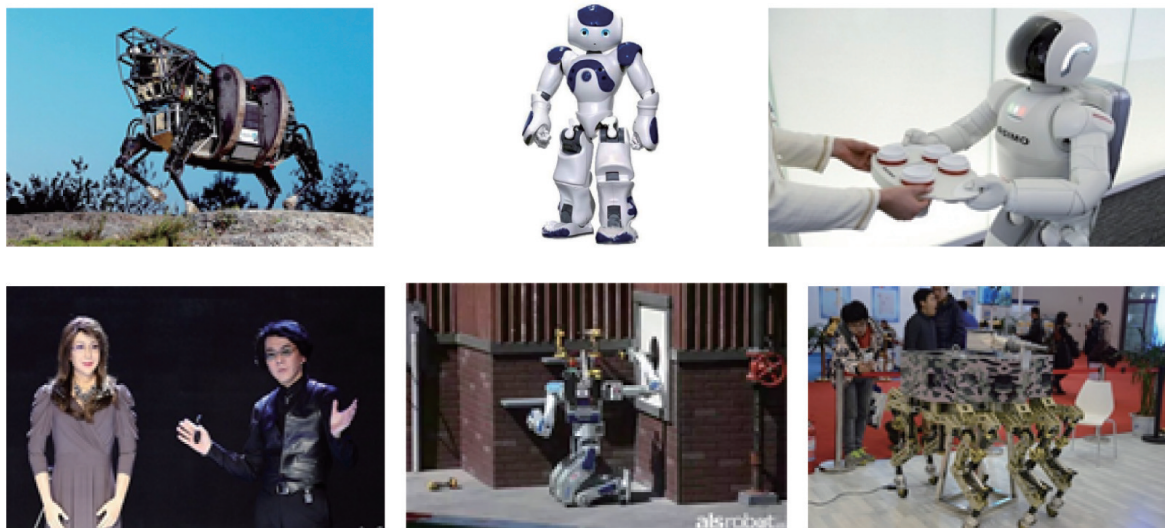


图3 仿生服务机器人

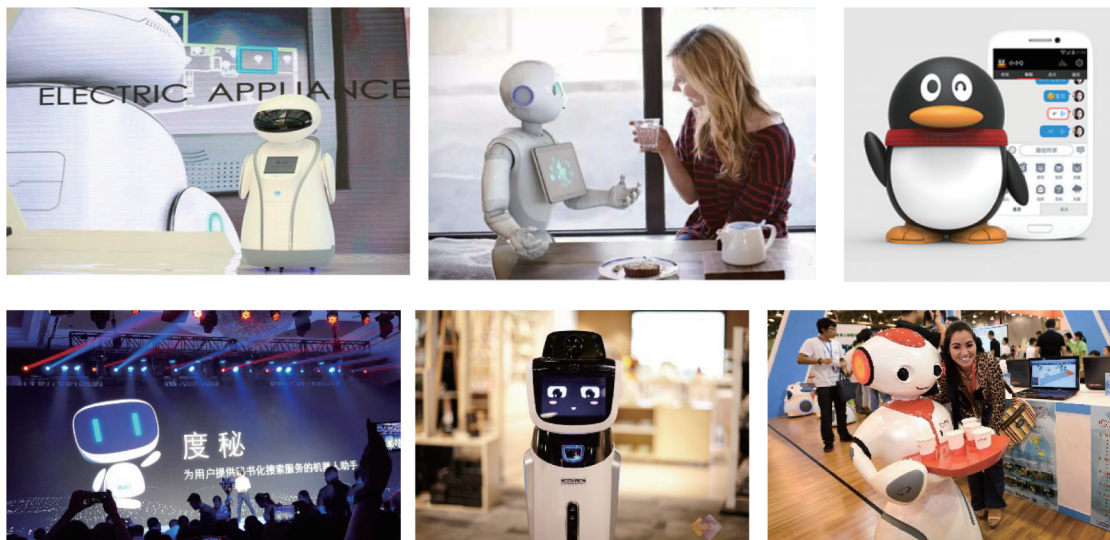


图4 国内服务机器人快速发展

2 服务机器人在智能社会中的重点方向,对未来生活模式的影响

2015年10月,Gartner公布了2016年及以后数年的十大战略预测,提出2016年是数字化的时代,在智能算法和机器人驱动的世界里,人和机器人的关系将被新定义^[9]。

智能社会是工业社会与信息社会广泛深度融合、技术全面更新换代、产业系统升级、经济社会结构深刻调整演进而成的新的经济社会发展形态,融合、协同、共享、共治是其鲜明特征,对人类生产、工作、生活方式将带来新的深刻变革^[10]。得益于大数据和云计算技术的进步和成熟,人工智能在理论研究与实际应用领域都取得了长足的进步。

与此同时互联网也将实现智能化,这构成了智能社会发展的公共基础设施,人们可以通过可穿戴智能设备或者植入式芯片随时随地与互联网交换信息。生物技术与虚拟现实技术拓宽了人类的感觉,许多科幻中的场景得以成为现实,人们甚至可以通过智能硬件实现疾病的远程诊断、实时监控。互联网、大数据、人工智能、云计算、生物技术、虚拟现实构成推动智能社会发展的几大核心动力^[11-16]。在另一方面,市场的迫切需求也反过来加速智能技术的

飞速发展。智能技术正处于拐点时期,一个崭新的智能社会即将到来。

服务机器人与人们的生活密切相关,现在已从信息技术(Information Technology, IT)时代进入到数据技术(Data Technology, DT)时代,未来将进入机器人技术(Robot Technology, RT)时代^[17]。未来发展的趋势,将朝面向服务机器人的类人脑认知与发育机制技术,机器人伦理与社会学技术,人机和谐共融的情感识别与交互机制,陪护机器人的情感理解技术等的发展反向。为人们提供监控、安防、看护、室内外清洁、教育、娱乐等多项服务的多功能服务机器人。多功能家庭服务机器人将给人们带来的便利性和舒适性^[18]。

3 服务机器人在智能社会应用的产品形态与关键技术

3.1 家用服务机器人

服务机器人是在非结构环境下为人类提供必要服务的多种高技术集成的智能化设备,其应用范围很广,主要从事维护保养、修理、运输、清洗、保安、救援、监护等工作。

3.1.1 服务机器人在未来智能社会中的重点应用与产品形态

未来智能社会中服务机器人包括教育娱乐机器人、家庭安全监控机器

人、基于网络音视频的替身机器人、具有短程代步功能的移动机器人、网络与社交机器人、面向情感交流的陪护机器人、面向公共服务的接待机器人等。

1) 家庭安全监控机器人。

在家庭中进行巡逻,探测闯入者、火险及煤气泄漏等隐患,自动按照预设路线进行巡视,并集成机器视觉、烟雾传感器、气体传感器等,采集家中的相关信息。如图5所示,家庭安全监控机器人发现陌生人闯入,通过机器视觉采集图像,通过无线网络反馈给家庭主人,由其判断是否报警;如发现煤气泄漏或火险等,通知远程的服务中心联系消防及时救援,同时通知家庭主人家中情况。

2) 面向情感交流的陪护机器人。

基于该陪护机器人,老人的家人、子女可上传个人日记、微博等信息到远程服务器,每天(或定期)从服务器下载以上信息,通过信息整合,以家人的语气、声音陪使用者谈话,进行交流,提供精神慰藉,如图6所示。陪护机器人的脸/上半身也可以集成一个显示器,远方的子女/亲人可以通过视频语音等方式与老人直接交流;根据老人的喜好,自动下载新闻、图书、音乐等,并阅读/播放给老人听。

3) 云服务机器人。

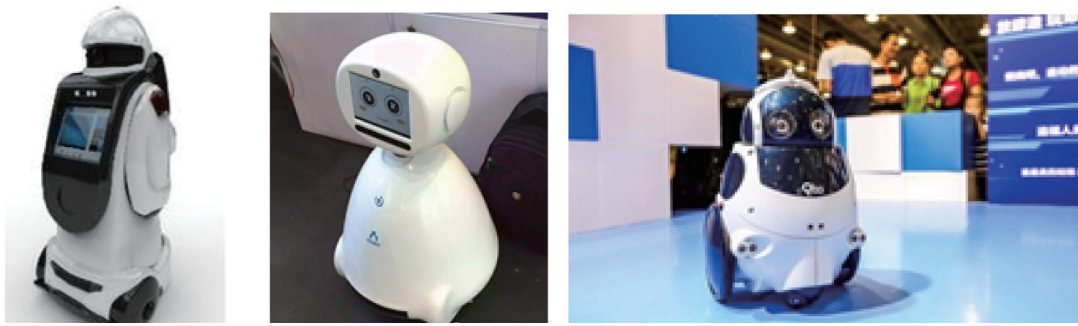


图5 家庭安全监控机器人



图6 面向情感交流的陪护服务机器人

卡耐基梅隆大学的 James Kuffner 教授首次提出,机器人从云平台中获取有关知识和技能,借助云计算,帮助机器人互相学习、共享知识。2011年欧盟资助了 RoboEarth 项目,旨在让机器人可以通过互联网分享知识,并且能够获取强大的机器人云服务。如图7所示,云服务机器人通过互联网和云计算,帮助机器人相互学习、共享知识,不仅降低成本,而且提高自主学习与适应能力,从而提高了其对复杂环境的适应性^[19,20]。

3.1.2 家用服务机器人若干关键技术

支撑服务机器人产业化发展与推广应用的关键技术包括面向非结构环

境下、低成本的即时定位与地图构建 (simultaneous localization and mapping, SLAM)、视觉的图像理解、高可靠性的语音识别与情感理解、人机共融的高安全决策机制、软体结构的新材料应用、人工皮肤、3D打印的轻量化/个性化结构设计、融合云计算/大数据的网络决策机制、可互换/可重复使用的模块化、多机合作的共享与学习技术等。

1) 用于服务机器人的低成本、高可靠的 SLAM 技术。服务机器人的 SLAM 技术,将实现机器人在未知环境中从一个未知位置开始移动,在移动过程中根据位置估计和地图进行自身定位,同时在自身定位的基础上建造增量

式地图,实现机器人的自主定位和导航,如图8所示,主要包括地图构建、传感、定位、建模等。

2) 高可靠性的机器人语音识别与情感理解技术。服务机器人与用户之间的自然和谐的交互,是提高用户体验、增强机器人可用性的重要因素。如图9所示,服务机器人如何自然感知、理解周围环境及人的意图,生成拟人的感情特征,最终使服务机器人与人自然地交互,是服务机器人的关键技术之一。核心技术包括服务机器人人机交互的情感机制,情感信号的获取、分析和建模,情感信号的感知、识别和理解,情感的生成与表达等。

3) 服务机器人软体结构技术。服务机器人的软体机构使用新型的合成材料构筑一个集生态、环保、工程安全性与一体的结构,模拟自然界的生物运动模式,可在大范围内任意改变自身形状、尺寸。如图10所示,美国哈佛大学研究人员提出了一种新型柔韧机器人,可像蠕虫一样依靠蠕动在非常狭窄的空间里活动。服务机器人的软体结构涉及材料、微机电、液压、控制等多学科,从材料、设计、加工、传感到控制等方面开展交叉与融合研究,在医疗、侦察、探测及救援等方面具有广阔的应用前景^[21]。

4) 用于服务机器人的人工皮肤技术。人工皮肤是指利用工程学和细胞生物学的原理和方法,在体外人工研制的皮肤代用品,用来修复、替代缺损的皮肤组织。美国斯坦福大学的鲍哲南



图7 基于云的服务机器人



图8 服务机器人SLAM技术



图9 服务机器人具有语音识别与情感理解



图10 软体服务机器人

领导的团队开发出一种塑料制成的人造皮肤,能够感知压力并与大脑沟通的柔性人造皮肤,像“1页纸那么薄”,分为两层,外层是可以感知压力的传感器,由塑料加上碳纳米管制成;内层是柔性电子电路,可以把压力信号改变成电子信号,并传递给大脑。如图11所示,通过这种材料能让机器人获得一种接近人类的皮肤,令机器人在智能化的基础上拥有“感觉”,包括人类指尖上的那种灵敏触感度。

3.2 医疗康复服务机器人

医疗康复服务机器人在未来智能社会,将以提高生活质量为目标,探索利用工程技术变革医疗健康服务模式,并面向个人、家庭/社区、医院及社会,提供用于健康管理、疾病诊疗及康复过程的新一代技术、系统及平台,实现人类生活的个性化、低价化、网络化和智能化。

医疗机器人将进一步实用化,在临床、康复、家庭等领域推广和普及,新型

家用医疗器械的发展将会促进健康管理模式的模式;新型家用医疗器械可以实现检测的即时化、日常化、非侵入,有效地分析健康趋势、监测疾病进程,进而实现早期治疗、个性化治疗等。同时,无线互连将改变原有的医疗模式,健康管理将在无线互连的技术支撑下实现无时不在、无处不在,实现云健康管理;无线互连将在健康状态监测、远程即时诊断、个人健康信息即时查阅等方面获得广泛应用。



图11 人工皮肤

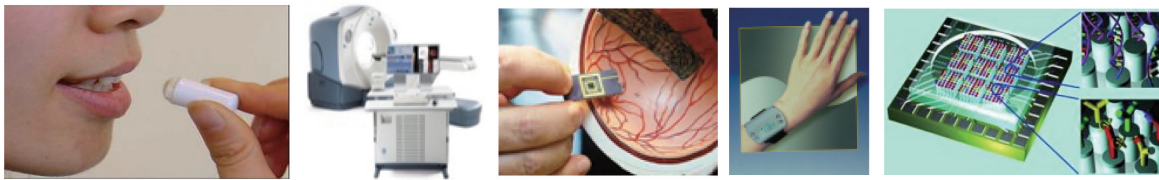


图12 医疗服务机器人用于早期诊断与预警

3.2.1 医疗康复机器人在未来智能社会中的重点应用与产品形态

在未来智能社会的重点应用形态与产品包括体域网与数字健康管理、医疗大数据与疾病防治、智能硬件与移动医疗服务、个性化精准诊疗、微创/无创诊疗、远程医疗、生物信息控制助老残、组织修复与器官替代等方面。

1) 疾病早期诊断与预警机器人。

介入式诊疗微型机器人(胶囊式微型机器人),包含微型泵、微型活检钳、微行走机构、微型注射器、微型摄像头、微传感器、能源、通信、控制等器件,具有摄像内窥镜、生理参数监测、药物释放、取样等功能。如图12所示,便携与穿戴式(疾病)监测仪器,通过传感器采集人体的生理数据(如血糖、血压、心率、血氧含量、体温、呼吸频率等),通过传感器、无线传输、中央处理器等技术助力医生进行全面、专业、及时的分析和治疗。

2) 微创/无创诊疗机器人。

微创/无创诊疗机器人以导航和机器人为手段,变革传统治疗理念和术式,提高治疗效果(高精度、低/无损伤)和效率,提升手术质量^[23]。围绕微创/无创治疗,美国约翰霍普金斯开发了基于手术CAD/CAM理念的系列智能手术工具,帝国理工大学研制了Acrobot

骨骼成形手术机器人,华盛顿大学则开发了轻便型的主从式手术操作机器人Raven系统,如图13所示。北京航空航天大学、哈尔滨工业大学等开发的骨科手术机器人已获得医疗器械三类注册证并实现产品销售;天津大学开发的妙手机器人也已进入产品报批程。

3) 康复及助老助残机器人。

康复及助老助残机器人的主要功能是辅助老年人和残疾人的日常生活,如图14所示,典型的产品有辅助腿脚不便的老年人和残疾人出行的智能轮椅或智能假肢,为瘫痪的老人进行康复和训练的机器人^[23]。围绕康复及助老助残,英国Argo公司开发了ReWalk外骨骼助行辅具,日本筑波大学开发了HAL外骨骼系统,美国UC Berkley将BLEEX外骨骼民用化为一种便携式康复辅具,应用前景广阔。

3.2.2 医疗康复服务机器人的若干关键技术

医疗康复机器人需突破的关键技术包括生理信息采集微纳传感器、健康大数据挖掘、多模态医学图像配准与融合、人体运动及生理功能的仿生、延时网络通讯与远程安全交互、可穿戴设备的人机耦合及实现、用于体内受限空间的高精度灵巧操作机构构型、个性化植入/介入医疗器械三维打印、健康智能

有效性与可用性评估技术等。

1) 可穿戴设备的人机耦合机制及实现技术。

以人为中心,实现人机接触和交互时人的个体特征与机的物理与功能特性之间的高度匹配。人的感知、认知、行为、生理结构、生物与环境相容性等特征与可穿戴式服务机器人的材料、传感、决策、控制等特性,均限定在一定范围内发挥作用,因而人机交互时的耦合性能,决定了可穿戴式服务机器人的可用性、有效性及舒适性,多样性人机耦合是可穿戴式机器人需突破的关键技术之一,从而实现人机之间自然交互和可穿戴式机器人设备大规模推广将逐渐成为可能。

2) 个性化植入/介入医疗机器人器械三维打印技术。

以人体生理信号、脑机电信息、神经传导、乃至情感等生物信息为借口通道控制助老助残机器人实现人的能力替代和增强的技术,从而解决老人残疾人的能力受限问题。可实现人按自己意图随意控制助老助残设备,达到人机合一的境界。

3) 健康大数据挖掘技术。

从群体数据中发现和描述健康特征和趋势的一系列过程和技术,实现对个体健康状况的长期持续性精准评估

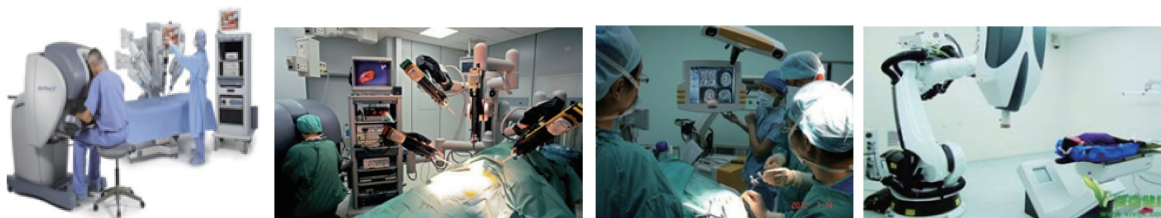


图13 微创诊疗服务机器人



图14 康复及助老助残机器人

和诊疗。以巨系统、物联网、数据挖掘、中医工程等为基础,可带动临床医学信息学、中医科学和工程、健康管理学等医学知识发现为主的新型医学服务技术的飞速发展。健康大数据挖掘技术将在慢病管理上首先获得突破,将促进医疗模式从关注疾病转向关注健康。

4 建议

1) 注重基础学科与技术开发的协同进展。

目前,国际上智能生活的研究仍处于发展时期,应积极加强与先进国家交流与合作,结合中国国情和需求,深入细致地进行理论研究,尽快接近或达到世界水平。

2) 支持发展关键共性技术以及面向产业化的技术。

当前,制约智能生活相关产业大发

展的主要因素还是行业共性关键技术。当抓住相关领域技术革命的时机,攻克智能生活所需服务机器人的关键技术,为实现不同的智能生活相关产品和服务打破技术壁垒^[24,25]。

3) 加强智能生活技术标准建设。

加快形成智能生活产业体系,需要技术、服务和资本共同推动,为智能生活企业的技术开发、产品制造和推广应用创造条件。在智能生活领域鼓励服务机器人产业标准和产业联盟标准的制订,允许重点实验室和产业联盟利用企业标准和产业联盟标准进行产品检测。加强数据标准化建设,整合大数据资源并加强数据开放工作。

4) 以产业链带动创新链。

实行以产业链为主导,高校科研单位参与研发的产学研模式,更有利于研发出符合消费者需求的新产品,更有利

于市场化的推广,更有利于服务机器人产业化发展。围绕要素整合、研发创造、商品化、社会效用化四个环节,建立以企业为主体的创新体系,处理好政府主导和市场机制的关系。

5 结论

中国人工智能技术攻关和产业应用发展势头良好,尤其是以服务机器人为代表的新兴智能科技成果已开始得到实际应用,有力的支撑中我国智能社会的建设与发展。本文分析了服务机器人的国际前沿与发展趋势,介绍了家用服务机器人、医疗康复机器人在未来智能社会的应用形态,阐述了需攻克的若干关键技术,并提出了服务机器人助力中国智能社会发展的建议。

致谢:王田苗、赵杰、韩建达、李泽湘、刘进长、张建伟、孙立宁、曲道奎、徐礼进、谭民、黄田、黄强、王耀南、刘成良、丁希仑、姜念云、欧勇盛、刘文勇、匡绍龙等对本文撰写提供了的帮助,在此表示诚挚的感谢。

参考文献(References)

[1] 尚勇. 加快机器人科技和产业创新 迎接即将到来的智能社会浪潮[N]. 科技日报, 2015-04-20.
 [2] 余惠敏. 迎接即将到来的智能社会[N]. 经济日报, 2015-10-26.
 [3] 中国科协信息中心. 智能社会科技专家论坛聚焦智能社会发展[EB/OL]. 2015-05-24. <http://www.cast.org.cn/n35081/n35096/n10225918/16407368.html>.
 [4] 王田苗, 陶永, 陈阳. 服务机器人技术研究现状与发展趋势[J]. 中国科学: 信息科学, 2012, 42(9): 1049-1066.
 [5] 宋章军. 服务机器人的研究现状与发展趋势[J]. 集成技术, 2012, 3(3): 1-9.
 [6] 嵇鹏程, 沈惠平. 服务机器人的现状及其发展趋势[J]. 常州大学学报: 自然科学版, 2010, 22(2): 73-78.
 [7] Patel S, Park H, Bonato P, et al. A review of wearable sensors and systems with application in rehabilitation[J]. J Neuroeng Rehabil, 2012, 9(12): 1-17.



- [8] Grayson A C R, Shawgo R S, Johnson A M, et al. A BioMEMS review: MEMS technology for physiologically integrated devices[J]. Proceedings of the IEEE, 2004, 92(1): 6-21.
- [9] Gartner 预测 2016 年十大战略科技趋势[EB/OL]. 2015-10-28. <http://www.d1ev.com/40676.html>.
- [10] 林兰, 屠启宇, 陈骞. 变革性技术: 改变生活、商业和全球经济 麦肯锡全球研究院《变革性技术》研究报告解读[J]. 华东科技, 2013(9): 68-71.
- [11] Cao H, Leung V, Chow C, et al. Enabling technologies for wireless body area networks: A survey and outlook[J]. Communications Magazine, IEEE, 2009, 47(12): 84.
- [12] Center for Devices and Radiological Health Office of Device Evaluation Applying human factors and usability engineering to optimize medical device design[EB/OL]. (2015-10-31). <http://www.fda.gov/RegulatoryInformation/Guidances/ucm259748.htm>.
- [13] Chan M, Estève D, Fourniols J Y, et al. Smart wearable systems: Current status and future challenges[J]. Artificial intelligence in medicine, 2012, 56(3): 137-156.
- [14] Mohammed S, Amirat Y, Rifai H. Lower-limb movement assistance through wearable robots: state of the Art and challenges[J]. Advanced Robotics, 2012, 26(1-2): 1-22.
- [15] 许红敬. 开启蓝海之旅有关可穿戴设备的机遇和赌注[J]. 消费电子, 2013(17): 34-41.
- [16] Spela K. Wearables in healthcare[EB/OL]. 2015-11-10. <https://www.wearable-technologies.com/2015/04/wearables-in-healthcare/>.
- [17] Service robots[EB/OL]. (2015-10-31). <http://www.ifr.org/service-robots/> International Federation of Robotics. Service robots.
- [18] 2014 年全球信息技术主管大会徐晓兰秘书长主题报告[EB/OL]. 2014-11-13. http://www.cie-info.org.cn/index/xhdt/20141113/1415869572947_1.html
- [19] 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.
- [20] 孔令富, 吴培良. 物联网机器人系统研究进展[J]. 燕山大学学报, 2013, 37(6): 471-479.
- [21] 何斌, 王志鹏, 唐海峰. 软体机器人研究综述[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2014, 42(10): 1596-1603.
- [22] 王伟, 王伟东, 闫志远, 等. 腹腔镜外科手术机器人发展概况综述[J]. 中国医疗设备, 2014(8): 5-10.
- [23] 邓志东, 程振波. 我国助老助残机器人产业与技术发展现状调研[J]. 机器人技术与应用, 2009(2): 20-24.
- [24] 十三问服务机器人解读-服务机器人发展趋势[EB/OL]. 2015-03-21. <http://www.gg-robot.com/asdisp2-65b095fb-40681-.html>.
- [25] 机器人产业如何从“跟跑”转向“并行”“领跑”[N/OL]. 科技日报, 2015-04-20. http://digitalpaper.stdaily.com/http_www.kjrb.com/kjrb/html/2015-04/20/content_300389.htm?div=5.

Make innovation in service robots, help china's future smart social development

TAO Yong

National Laboratory of Aerospace, Chinese Institute of Aeronautical Engineering Development Strategies, Beihang University, Beijing 100191, China

Abstract With the rapid development of mobile Internet, big data, cloud computing, artificial intelligence, smart sensing, micro-nano manufacturing and biological materials, the information age revolution is changing people's daily life. The intelligent society for people living and working will bring great changes gradually. Intelligent service robots is expected to play an irreplaceable role in the future of intelligent life. Firstly, the international frontier and the development trend of service robots are proposed. The service robot's impact on future mode of life is introduced. The application form and a number of key technology of the household service robots and medical robots are presented respectively. Finally, the proposals of intelligent service robots boost social development are given.

Keywords intelligent society; service robots; household; medical rehabilitation

基金项目: 中国工程院战略咨询研究项目

作者简介: 陶永, 讲师, 研究方向为战略咨询, 实验室建设与管理, 电子信箱: taoy@buaa.edu.cn

(责任编辑 刘志远)