

· 综述 ·

康复机器人的分类探讨

张飞 喻洪流 王露露 孟巧玲 李素姣 倪伟

康复机器人是一种用于帮助功能障碍患者进行生活辅助及功能治疗的设备,是康复医学和机器人技术的完美结合^[1]。在功能治疗方面,康复机器人将运动神经康复治疗技术和机器人进行融合,提高临床康复效果^[2]。此外,随着机电交互、智能控制及人机交互等技术的不断发展,大部分康复治疗机器人集成了更完善的功能,包括康复评估系统 and 治疗反馈系统,患者在计算机虚拟环境中完成多关节或单关节康复训练,可以更好促进运动功能改善^[3]。在日常生活辅助方面,越来越多的康复机器人广泛应用于功能障碍者的行走辅助、饮食辅助、个人卫生护理等。本文在对不同类型康复机器人的最新技术进展进行分析总结的基础上,对康复机器人进行系统的分类,并对康复机器人未来的发展趋势进行展望。

目前,国际标准还没有对康复机器人进行具体分类,许多学者对康复机器人的分类也具有不同的论述。由 DeLisa 等^[4]美国著名物理医学与康复专家编写的《物理医学——理论与实践》将康复机器人分为机器人辅具、假肢、矫形器、康复治疗机器人四大类。加拿大康复专家 Van der Loos 和 Reinkensmeyer^[5]认为,康复机器人一般分为治疗机器人和辅具机器人,此外,还包括康复机器人方面的智能假肢、矫形器、功能神经电刺激(FNS)和 ADLs 诊断与监测技术等;马来西亚 Yakub 教授等^[6]将康复机器人分为治疗型康复机器人和辅助型康复机器人,并将治疗机器人又按治疗类型的不同分为情绪治疗型康复机器人和物理治疗型康复机器人,将辅助型康复机器人又分为社会交互辅助型康复机器人和物理交互辅助型康复机器人;北京大学第一医院康复医学科的周媛博士等^[2]将康复机器人粗略分为辅助/替代型康复机器人和训练/治疗型康复机器人。

康复机器人的分类方法

通过对国内外相关文献以及康复机器人的功能用途进行分析,并参考国际标准对康复辅助器具的三级分类方法,本文将康复机器人分为功能治疗类康复机器人和生活辅助类康复机器人两个主大类;再按功能的不同分为 4 个次类,并将 4 个次类进一步分为若干支类,其详细分类情况如图 1 所示。

一、功能治疗类康复机器人的范畴与分类

功能治疗类康复机器人作为医疗用康复机器人的主要类型,可以帮助功能障碍患者通过主、被动的康复训练模式完成

各运动功能的恢复训练,如上肢康复训练机器人、下肢康复训练机器人等。此外,一些治疗类康复机器人还兼具诊断、评估等功能,并结合虚拟现实技术以提高康复效率。功能治疗类康复机器人按作用类型不同又可分为功能恢复型康复机器人和功能增强型康复机器人两个次类。

(一) 功能恢复型康复机器人(康复训练机器人)

功能恢复型康复机器人主要是在康复医学的基础上,通过一定的机械结构及工作方式,引导及辅助具有功能障碍的患者进行康复训练。由于功能训练型康复机器人的体积庞大及结构复杂,一般为固定平台式,使用者需在特定的指定点使用,所以其既不能达到生活辅助功能,也不能起到功能增强作用。功能恢复型康复机器人按作用的部位不同可分为固定平台式上肢康复训练机器人和固定平台式下肢康复训练机器人。

固定平台式上肢康复训练机器人是基于上肢各关节活动机制而设计的用于辅助上肢进行康复训练的康复设备,按其作用机制不同可分为末端驱动式、悬吊式和外骨骼式:①末端驱动式上肢康复机器人是一种以普通连杆机构或串联机构为主体机构,通过对上肢功能障碍患者的上肢运动末端进行支撑,使上肢功能障碍患者可按预定轨迹进行被动训练或主动训练,从而达到康复训练目的的康复设备。具有代表性的末端驱动式上肢康复机器人有日本大阪大学研制的 6 自由度上肢康复训练系统^[7]、美国麻省理工大学研制的上肢康复机器人 MIT-Manus^[8]。②悬吊式上肢康复机器人是一种以普通连杆机构及绳索机构为主体机构,依靠电缆或电缆驱动的操纵臂来支持和操控患者的前臂,可使上肢功能障碍患者的上肢在减重的情况下实现空间任意角度位置的主、被动训练的康复设备。具有代表性的悬吊式上肢康复机器人有意大利帕多瓦大学研制的上肢康复机器人 NeReBot^[9]、瑞士 Hocoma 公司研制的上肢康复训练系统 Armeo Boom^[10]。③外骨骼式上肢康复机器人是一种基于人体仿生学及人体上肢各关节运动机制而设计的,用于辅助上肢功能障碍患者进行康复训练的康复辅助设备,根据其特殊的机械结构紧紧依附于上肢功能障碍患者的上肢,带动上肢功能障碍患者进行上肢的主、被动训练。具有代表性的外骨骼式上肢康复机器人有瑞士苏黎世大学研制的上肢康复机器人 ARMin^[11]、瑞士 Hocoma 公司研制的上肢康复机器人 Armeo Spring、Armeo Power 等^[12-13]。

固定平台式下肢康复训练机器人是基于模拟步态及下肢各关节活动机制而设计的用于辅助下肢进行康复训练的康复设备,按其作用机制和工作方式的不同可分为外骨骼式和末端驱动式:①外骨骼式下肢康复机器人是一种基于模拟步态并在各关节处配置相应自由度及活动范围,可自行进行步态模拟工作的康复设备。当工作时,外骨骼式下肢康复机器人通过机械机构及绑带将使用者上身固定或进行悬吊,在带动上肢功能障碍患者进行上肢的主动训练或被动训练的同时,可为患者提供保护和身体支撑作用。具有代表性的外骨骼式下肢康

DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2017.08.020

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61473193);上海市科委支撑项目(16441905602、16441905102);上海市地方能力建设项目(16060502500);上海康复器械工程技术研究中心建设专项(15DZ2251700)

作者单位:200093 上海,上海理工大学康复工程与技术研究所;上海康复器械工程技术研究中心;民政部神经功能信息与康复工程重点实验室
通信作者:喻洪流,Email: yhl98@hotmail.com

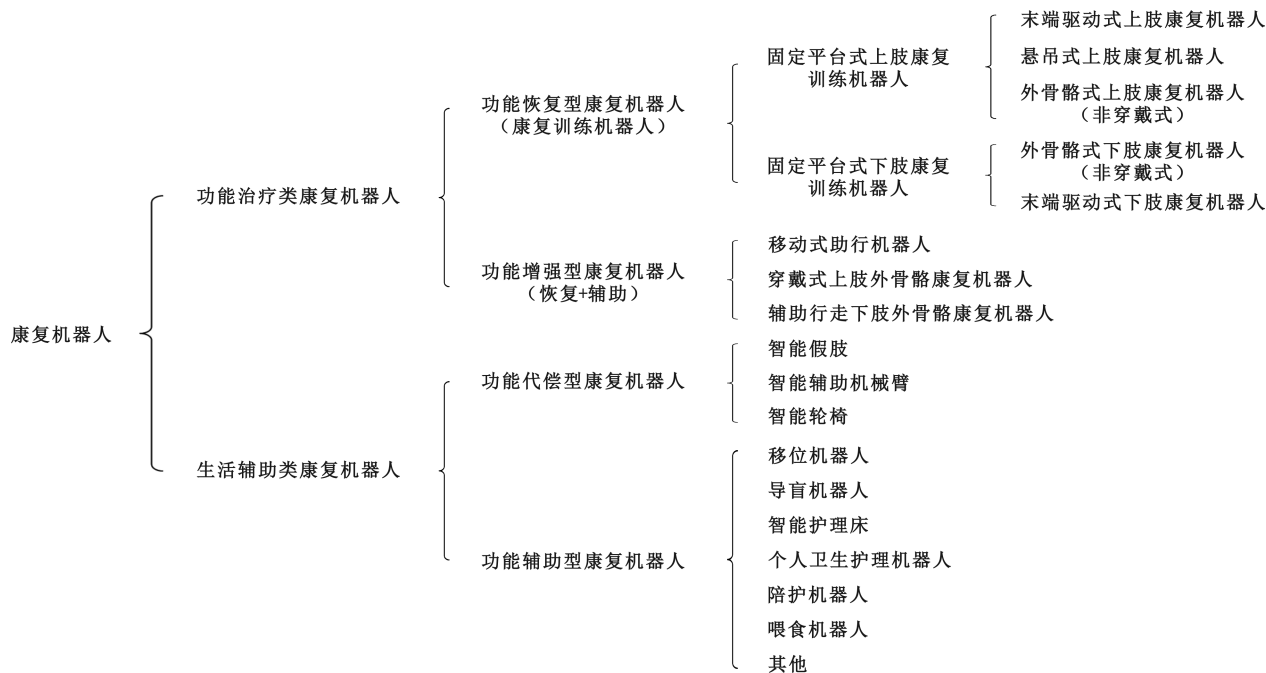


图1 康复机器人分类

复机器人有瑞士苏黎世大学附属医院的脊椎损伤康复中心与瑞士 Hocoma 医疗器械公司联合研制的下肢康复机器人 Lokomat^[13]、德国 Reha-Stim 研究所研制的下肢康复机器人 Gait Trainer^[14]。②末端驱动式下肢康复机器人是一种以普通连杆机构或串联机构为主体机构,通过对下肢功能障碍患者的下肢运动末端进行支撑,基于模拟步态,引导下肢功能障碍患者实现下肢各关节的主、被动协调训练,从而达到下肢康复训练效果的康复设备。具有代表性的末端驱动式下肢康复机器人有以色列 Motorika 和 Healthsouth 公司联合研制的下肢康复机器人 AutoAmbulator^[15]和 Hocoma 公司研制的下肢康复系统 Erigo^[16]。

(二)功能增强型康复机器人

功能增强型康复机器人通常为移动穿戴式,是一种不仅可帮助患者进行康复训练以恢复肢体功能,而且还具有功能辅助作用的复合型康复机器人,这类机器人体积及结构较为轻巧,多为可移动式。根据工作方式及工作部位的不同,功能增强型康复机器人可分为移动式助行机器人、穿戴式上肢外骨骼康复机器人和辅助行走下肢外骨骼康复机器人。

1. 移动式助行机器人:是一种基于康复医学原理,通过模拟步态,辅助下肢功能障碍患者行走,并同时进行下肢康复训练的康复辅助设备。其工作机制是在为行走功能障碍患者提供辅助行走的同时为其提供主、被动的康复训练。具有代表性的移动式助行康复机器人有新西兰 Rex Bionics 公司研制的下肢外骨骼助行康复机器人 REX^[17]、韩国西江大学研制的外骨骼式助行机器人 SUBAR^[18]。

2. 穿戴式上肢外骨骼康复机器人:是一种穿戴于人体上肢外部的康复设备,通过引导上肢功能障碍患者的患肢关节做周期性运动加速关节软骨及周围韧带和肌腱的愈合和再生,从而达到上肢的康复训练。具有代表性的穿戴式上肢外骨骼康复机器人有美国宾夕法尼亚大学研制的可穿戴机械臂 Titan、美国 Myomo 公司研制的肘关节训练器^[19]、上海理工大学研制的外骨

骼机械手^[20]。

3. 辅助行走下肢外骨骼康复机器人:是一种穿戴于下肢功能障碍患者下肢外部的康复设备,其在生理步态研究的基础上设定模拟步态,控制各活动部件,在辅助下肢功能障碍患者行走的同时也辅助其进行康复训练。具有代表性的辅助行走下肢外骨骼康复机器人有以色列 ReWalk 医疗科技公司研制的外骨骼机器人 Re-Walk^[21]、日本筑波大学研制的外骨骼机器人 HAL-5^[22]、美国范德堡大学研制的动力外骨骼机器人 Indego^[23]等。

二、生活辅助类康复机器人范畴与分类

生活辅助类康复机器人主要利用机器人为行动不便的老年人或残疾人提供各种生活辅助,补偿其弱化的机体功能,如智能假肢、智能轮椅、智能辅助机械臂等。一些生活辅助类康复机器人还具有生理信息检测及反馈技术,为使用者提供全面的生活保障。生活辅助类康复机器人按作用功能不同可分为功能代偿型康复机器人和功能辅助型康复机器人两个次类。

(一)功能代偿型康复机器人

功能代偿型康复机器人作为部分肢体的替代物,替代因肢体残缺而丧失部分功能的患者的部分肢体,从而使患者得以最大可能地实现部分因残缺而丧失的身体机能。功能代偿型康复机器人按作用不同可分为智能假肢、智能辅助机械臂、智能轮椅等。

1. 智能假肢:又叫神经义肢或生物电子装置,其原理是利用现代生物电子学技术为患者把人体神经系统与图像处理系统、语音系统、动力系统等装置连接起来,以嵌入和听从大脑指令的方式替代这个人群的躯体部分缺失或损毁的人工装置。智能假肢包括上肢智能假肢与下肢智能假肢。具有代表性的上肢智能假肢有德国奥托博克公司的智能仿生肌电手 Michelangelo^[24]、英国 RSL Steeper 公司研制的的肌电假手 Bebionic3^[25]。具有代表性的下肢智能假肢有冰岛 Ossur 公司

的智能假肢 Power Knee^[26]、德国奥托博克公司的智能仿生假肢 Genium 和智能仿生大腿膝关节 C-Leg^[27]等。

2. 智能辅助机械臂:是一种用于生活辅助的机械臂,其结构类似于普通工业机械臂,主要作用是老年人或残疾人等上肢功能不健全的人群提供一定的生活辅助。智能辅助机械臂的服务对象是人,所以需要研究人机交互、人机安全等诸多问题,这与工业机器人的最大区别。其关键技术涵盖机器人机构及伺服驱动技术、机器人控制技术、人机交互及人机安全技术等。具有代表性的智能辅助机械臂有日本产业技术综合研究所研制的辅助机器臂 Rapuda^[28]、荷兰 Exact Dynamics 公司研制的 6 自由度机械臂 Manus^[29]。

3. 智能轮椅:是一种将智能机器人技术与电动轮椅相结合,用于辅助使用者行走的辅助设备,其融合多种领域的研究,在传统轮椅上叠加控制系统、动力系统、导航系统、检测反馈系统等。可实现多姿态转换、智能控制及智能检测与反馈功能,智能轮椅也被称智能式移动机器人。具有代表性的智能轮椅有麻省理工学院智能实验室 Wheelesley 项目研制的半自主式智能轮椅^[30]、法国的 VAHM 项目研制的智能轮椅^[31]、日本爱信精机和富士通公司共同研制开发的智能轮椅 TAO Aicle^[32]。

(二) 功能辅助型康复机器人

功能辅助型康复机器人是通过部分补偿机体功能以增强老年人或残疾人弱化的机体功能来帮助完成日常活动的一类康复辅助设备。功能辅助型康复机器人主要包括移位机器人、导盲机器人、护理床、个人卫生机器人、陪护机器人、喂食机器人等。

1. 移位机器人:是一种能够根据所测压力自动协调各部位驱动部件的输出功率,通过机器臂调整卧床患者的姿态位置的生活辅助设备。移位机器人基于多传感器数据融合技术及智能控制技术,可分析检测附近环境信息及护理对象生理数据信息。具有代表性的移位机器人有日本日本理化学研究所仿生控制研究研制的护理机器人 RI-MAN^[33]、美国 Vecna Robotics 公司研制的救援机器人^[34]。

2. 导盲机器人:是集环境感知、动态决策与规划、行为控制与执行等多种功能于一体的综合系统,它通过多种传感器对周围环境进行探测,将探测的信息反馈给视觉障碍者,帮助弥补患者视觉信息的缺失以避免日常生活中的障碍物,成功行走至目的地,有效提高其生活质量。它属于服务机器人范畴。导盲机器人作为视觉障碍者提供环境导引的辅助工具,具有代表性的导盲机器人有日本 NSK 公司研制的机器导盲犬、美国麻省理工学院的 Dubowsky 教授等研制的具有智能型步行机和智能手杖装置 PAMM 系统^[35]。

3. 智能护理床:是一种为生活不便或瘫痪在床的老年人和残疾人提供生活护理而设计的生活辅助设备。智能护理床不仅可以通连杆铰链的机械结构,以及直线推杆作为动力源,实现患者翻身、起背、屈伸腿等辅助换姿活动,还可以基于传感器应用的生理参数监测系统以及人机交互系统检测人体生理参数监测系统,判断人体的生理状况。智能护理床机器人中比较有代表性的有美国史赛克医疗公司研制的智能护理床^[36]、瑞典 ArjoHuntleigh 公司研制的智能护理床 Enterprise9000^[37]。

4. 个人卫生护理机器人:是一种为那些因为不同原因导致的生理能力下降或功能丧失而无法实现自我照料的老年人、残

疾人和无知觉病人而设计的生活辅助装置。其通过微控制器及多传感器融合技术,检测生命体特征,再经过按键或语音控制方式,控制个人卫生机器人进行相应动作。个人卫生机器人包括大小便处理机器人和辅助洗澡机器人。具有代表性的个人卫生机器人主要有日本安寝全自动智能排泄处理机器人、日本研制的自动洗澡机 Avant Santelubain999。

5. 陪护机器人:是一种具有生理信号检测、语音交互、远程医疗、自适应学习、自主避障等功能的多功能服务机器人,其能够通过语音和触屏交互系统与使用者进行沟通,并通过多方位检测设备检测使用者的生理数据信息,从而进行相应实施处理。具有代表性的陪护机器人有德国弗劳恩霍夫制造技术和自动化研究所研制的服务机器人 Care-O-Bot^[38]、奥地利维也纳技术大学研制的护理机器人 Hobbit^[39]。

6. 喂食机器人:是一种提供饮食辅助的机器人,其原理是基于多传感器融合技术,通过多自由度串联机械臂协助使用者进食。喂食机器人服务的对象主要为由于肌萎缩侧索硬化症、脑性瘫痪、帕金森病和脑或脊髓损伤等造成手部不灵活的患者、甚至手缺失的患者。具有代表性的喂食机器人有美国 Desin 机器人公司自主研发的智能喂食机器人 OBI、日本的 SECOM 公司研发的助餐机器人 My Spoon^[40]。

康复机器人发展趋势及展望

由于智能化的需要,当前康复机器人技术的发展趋势逐渐倾向于智能人机交互技术、环境智能感知技术、自适应智能控制技术等方面发展。以视觉交互、语音交互、脑机接口为代表的智能人机交互技术和利用激光、红外、超声、声纳的环境智能感知技术越来越多地应用到康复机器人设备上,使上肢康复机器人具有更好的自适应功能与检测反馈功能。随着人工智能技术的进步,康复机器人将能更加智能地感知人体运动意图,实现人机共融。

康复机器人也更多地向轻量化、便携式发展,将碳纤维、稀土永磁等新型材料及石墨烯电池技术应用于康复机器人使其轻便,且具有足够的强度、韧性、更强的续航能力,同时不会影响穿戴者的健康。另外,用良好的人机工程学设计使使用者从心理上接受也非常关键。模块化设计为推动康复机器人的实用提供了新的概念和思路。

康复机器人另一个发展趋势就是物联网化。通过物联网化实现远程人机交互、远程医患交互、人机智能交互,使康复不再是单一的一项任务,而是成为一个系统工程,从而实现更好的康复效果。

参 考 文 献

- [1] 张晓玉,王凯旋.机器人辅助技术、康复机器人与智能辅具[J].中国康复,2013,28(4):246-248. DOI:10.3870/zgkf.2013.04.002.
- [2] 周媛,王宁华.康复机器人概述[J].中国康复医学杂志,2015,30(4):400-403. DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2005.04.024.
- [3] 张秀芳,高晓盟,赵娜,等.上肢康复机器人训练对脑卒中偏瘫患者上肢功能恢复的影响[J].中华物理医学与康复杂志,2016,38(3):180-182. DOI:10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2016.03.005.
- [4] 吴洁,喻洪流,杨武庆,等.上海康复器械的路线图研究[C]//全国技术预见学术研讨会.2013.
- [5] Van der Loos HFM, Reinkensmeyer DJ. Rehabilitation and health care

- robotics//Springer Handbook of Robotics [M]. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2008; 1223-1251.
- [6] Yakub F, MdKhudzari AZ, Mori Y. Recent trends for practical rehabilitation robotics, current challenges and the future [J]. Int J Rehabil Res, 2014, 37(1): 9-21. DOI: 10.1097/MRR.000000000000035.
- [7] Furusho J, Kikuchi T, Haraguchi M. Development of rehabilitation systems for upper limbs: EMUL, robot therapist, and PLEMO [J]. Assist Technol Res, 2011, 28(1): 84-92.
- [8] 胡鑫, 王振平, 王金超, 等. 脑卒中上肢康复训练机器人的研究进展与展望 [J]. 中国康复理论与实践, 2014, 32(10): 901-904. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9771.2014.10.001.
- [9] Maciejasz P, Eschweiler J, Gerlach-Hahn K, et al. A survey on robotic devices for upper limb rehabilitation [J]. J Neuroeng Rehabil, 2014, 11(1): 1-29. DOI: 10.1186/1743-0003-11-3.
- [10] Turchetti G, Vitiello N, Trieste L, et al. Why effectiveness of robot-mediated neurorehabilitation does not necessarily influence its adoption. [J]. IEEE Rev Biomed Eng, 2014, 7(1): 143-153. DOI: 10.1109/RBME.2014.2300234.
- [11] Cao WJ, Yu HL, Wang LL. Study of a novel center-driven robot for upper limb rehabilitation. International Convention on Rehabilitation Engineering & Assistive Technology [C]. Singapore: Singapore Therapeutic, Assistive & Rehabilitative Technologies (START) Centre, 2015.
- [12] Colomer C, Baldoví A, Torromé S, et al. Efficacy of Armeo® Spring during the chronic phase of stroke. Study in mild to moderate cases of hemiparesis [J]. Neurologia, 2013, 28(5): 261-267. DOI: 10.1016/j.nrl.2012.04.017.
- [13] Wang H, Zhang D, Lu H, et al. Active training research of a lower limb rehabilitation robot based on constrained trajectory [C]. IEEE Int Conf Adv Mech Syst, 2015; 24-29. DOI: 10.1109/ICAMEchS.2015.7287123.
- [14] Chen J, Zhang X, Wang H, et al. Control strategies for lower limb rehabilitation robot [C]. IEEE Int Conf Inform Autom, 2014; 121-125. DOI: 10.1109/ICInfA.2014.6932638.
- [15] Krebs HI, Hogan N. Robotic therapy: the tipping point [J]. Am J Phys Med Rehabil, 2012, 91(11): 115-125. DOI: 10.1097/PHM.0b013e31826bcd80.
- [16] 刘林. 下肢康复机器人的分析与研究 [D]. 沈阳工业大学, 2015.
- [17] Tamezduque J, Cobianugale R, Kilicarslan A, et al. Real-Time Strap Pressure Sensor System for Powered Exoskeletons [J]. Sensors, 2015, 15(2): 4550. DOI: 10.3390/s150204550.
- [18] Xie S. Advanced robotics for medical rehabilitation [M]. Germany: Springer International Publishing, 2016. DOI: 10.1007/978-3-319-19896-5.
- [19] Bleakley SM. The effect of the myomo robotic orthosis on [J]. Dissertations & Theses-Gradworks, 2013, 64(4): 184-234.
- [20] Cao WJ, Hu J, Wang ZP, et al. Study on a novel wearable exoskeleton hand function training system based on EMG triggering. Wearable Sensors and Robots [M]. Singapore: Springer Publishing, 2017; 135-143. DOI: 10.1007/978-981-10-2404-7-12.
- [21] Esquenazi A, Talaty M, Packel A, et al. The ReWalk powered exoskeleton to restore ambulatory function to individuals with thoracic-level motor-complete spinal cord injury [J]. Am J Phys Med Rehabil, 2012, 91(11): 911-921. DOI: 10.1097/PHM.0b013e318269d9a3.
- [22] Ma W, Zhang X, Yin G. Design on intelligent perception system for lower limb rehabilitation exoskeleton robot [C]// International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence, 2016; 587-592. DOI: 10.1109/urai.2016.7625785.
- [23] Aach M, Meindl R, Gessmann J, et al. Exoskelette in der Rehabilitation Querschnittgelähmter [J]. Der Unfallchirurg, 2015, 118(2): 130-137. DOI: 10.1007/s00113-014-2616-1.
- [24] Strasser B, Fuchs D. Role of physical activity and diet on mood, behavior, and cognition [J]. Neurol Psychiatry Brain Res, 2015, 21(3): 118-126.
- [25] Al-Timemy AH, Khushaba RN, Bugmann G, et al. Improving the performance against force variation of EMG controlled multifunctional upper-limb prostheses for transradial amputees [J]. IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng, 2016, 24(6): 650-661. DOI: 10.1109/TNSRE.2015.2445634.
- [26] 曹武警, 喻洪流, 胡杰, 等. 基于不同信号源的智能膝关节控制方法研究 [J]. 中国康复医学杂志, 2016, 31(10): 1129-1132. DOI: 10.3969/j.issn.1001-1242.2016.10.015.
- [27] Lura DJ, Wernke MM, Carey SL, et al. Differences in knee flexion between the Genium and C-Leg microprocessor knees while walking on level ground and ramps [J]. Clin Biomech, 2015, 30(2): 175-181. DOI: 10.1016/j.clinbiomech.2014.12.003.
- [28] Wakita Y, Oyama E, Yoon WK, et al. User evaluation of service robotic arms based on ICF through interviews with people with upper-limb disability [C]. IEEE Intern Con Robot Biomimet, 2013; 1282-1287. DOI: 10.1109/ROBIO.2013.6739641.
- [29] Kim DJ, Wang Z, Behal A. Motion segmentation and control design for UCF-MANUS: an intelligent assistive robotic manipulator [J]. IEEE ASME Transactions on Mechatronics, 2012, 17(5): 936-948. DOI: 10.1109/TMECH.2011.2149730.
- [30] Touati Y, Alicherif A. Smart powered wheelchair platform design and control for people with severe disabilities [J]. Software Eng, 2012, 2(3): 49-56. DOI: 10.5923/j.se.20120203.02.
- [31] 顾余辉, 陈爽, 喻洪流. 智能轮椅的研究现状与趋势 [J]. 世界康复工程与器械, 2014, 4(1): 51-54.
- [32] Matsumoto O, Komoriya K, Hatase T, et al. Intelligent wheelchair robot "TAO Aicle" [J]. Prostate, 2014, 74(12): 1199-1208. DOI: 10.7210/jrsj.24.164.
- [33] Ding J, Lim YJ, Solano M, et al. Giving patients a lift-the robotic nursing assistant (RoNA) [C]// IEEE Int Conf Technol Pract Robot Appl, 2014; 1-5.
- [34] Kim TY, Jung S, Yoo WS. Lumped track modeling for estimating traction force of vecna BEAR type robot [J]. T Korean Soc Mech Eng A, 2015, 39(3): 275-282. DOI: 10.3795/KSME-A.2015.39.3.275.
- [35] Lu CK, Huang YC, Lee CJ. Adaptive guidance system design for the assistive robotic walker [J]. Neurocomputing, 2015, 170: 152-160. DOI: 10.1016/j.neucom.2015.03.091.
- [36] 蒋皆恢, 潘晓洁, 姜贤波, 等. 基于智能检测与康复的多功能护理床 [J]. 中国医疗器械杂志, 2016, 40(1): 47-51. DOI: 10.3969/j.issn.1671-7104.2016.01.014.
- [37] 曹武警, 喻洪流, 雷毅, 等. 智能护理床技术发展 [J]. 生物医学工程学进展, 2015, 36(4): 217-220. DOI: 10.3969/j.issn.1674-1242.2015.04.007.
- [38] Webster M, Dixon C, Fisher M, et al. Toward reliable autonomous robotic assistants through formal verification: a case study [J]. IEEE Trans Human-Mach Syst, 2016, 46(2): 186-196. DOI: 10.1109/THMS.2015.2425139.
- [39] Fischinger D, Einramhof P, Papoutsakis K, et al. Hobbit, a care robot supporting independent living at home: first prototype and lessons learned [J]. Robot Auton Syst, 2016, 75(1): 60-78. DOI: 10.1016/j.robot.2014.09.029.
- [40] 张祥, 喻洪流, 雷毅, 等. 国内外饮食护理机器人的发展状况研究 [J]. 中国康复医学杂志, 2015, 30(6): 627-630. DOI: 10.3969/j.issn.1001-1242.2015.06.028.

(修回日期: 2017-04-23)

(本文编辑: 汪 玲)