

残疾人智能移动助行器的发展现状及趋势

陶春静¹, 晏箐阳², 马俐芳¹, 黄剑^{2*}

1. 国家康复辅具研究中心, 北京市老年功能障碍康复辅助技术重点实验室, 北京 100176

2. 华中科技大学人工智能与自动化学院, 图像信息处理与智能控制教育部重点实验室, 武汉 430074

摘要 智能助行器能帮助行走困难者轻松、自由地行走, 有效缓解传统助行器单一功能与患者多样需求之间的矛盾。综述了智能助行器的感知、交互与控制、安全性等方面的研究成果, 并结合新材料及人工智能新技术的发展探讨了智能助行器的发展趋势。

关键词 智能助行器; 助行辅助; 感知系统; 人机交互

目前, 世界各国都面临着残疾人群数目庞大带来的众多民生问题。根据世界卫生组织的调查数据可知, 全球人口中残疾人患者约占 15%, 在残疾人口中其中约有 2.85 亿名视力受损或失明患者^[1]。人口老龄化和慢性疾病增多也导致残疾率在不断上升^[2]。在中国, 随着社会老龄化的加剧和人民生活水平的提高, 由脑卒中、脊髓损伤、脑外伤等原因造成的残障人口迅速增长^[3]。与非残疾人相比, 由于肢体损伤或活动受限, 残疾人群的日常行走活动或者行走康复训练都需要外界设备或护理

人员来辅助。但护理人员数量匮乏, 护理费用昂贵, 人工远远不能满足众多患者的日常生活中的辅助需求。因此在日常生活中, 价格相对低廉的助行器设备是日常行走及康复训练中常用的辅助手段。

助行器是用于辅助使用者进行站立和步行活动的器具, 属于助行康复辅具, 能够有效地帮助使用者改进和提高行走能力, 大量的残疾患者需要这类助行康复辅具。然而, 传统的助行器主要是借助人工力量或者借助简单器械带动患肢或患者进行移动, 包括假肢^[4]、手杖、臂杖、腋拐、轮椅、助步架等

收稿日期: 2019-07-02; 修回日期: 2019-10-31

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(61533004); 国家自然科学基金项目(61473130); 华中科技大学研究生创新项目基金项目(5003184019)

作者简介: 陶春静, 教授级高级工程师, 研究方向为康复工程, 电子信箱: taochunjing@nrcrta.cn; 晏箐阳(共同第一作者), 博士研究生, 研究方向为智能控制和康复机器人控制, 电子信箱: yanqingyang@mail.hust.edu.cn; 黄剑(通信作者), 教授, 研究方向为康复机器人、网络控制系统和生物信息处理, 电子信箱: huang_jan@mail.hust.edu.cn

引用格式: 陶春静, 晏箐阳, 马俐芳, 等. 残疾人智能移动助行器的发展现状及趋势[J]. 科技导报, 2019, 37(22): 37-50; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2019.22.005

(图 1),仅可以起到被动支撑辅助作用,且功能单一,在使用者自主的日常活动或康复训练中会消耗使用者大量的体力。

(a) 假肢^[4]

(b) 手杖

(c) 轮椅

(d) 行走助步架

图 1 传统助行康复辅具

Fig. 1 Traditional walking-aids

随着科技的迅速发展,“人工智能”已经渗透到助行设备领域。智能助行设备的身影也随着智能技术的迅速发展逐渐出现在在残疾人的日常生活中。中国于 2011 年将“智能型残障人生活辅具的研发”列入“十一五”社会发展领域十大科技成果,大力发展智能辅具产业,提高残疾患者的生活质量^[5]。医疗器械科技产业“十二五”专项规划中也曾明确指出,在康复领域,围绕中国“人人享有康复”的需求,根据普惠化、智能化、个性化等发展趋势,研究结构替代、功能代偿、技能训练、环境改造等技术产品^[6]。在新一代的科技浪潮中,智能助视/助行辅具等逐渐涌现。

1 智能助行器概述

广泛意义上来讲,智能助行辅具的主要功能是利用科技手段帮助使用者在一定程度上突破原有的行走能力限制、提高活动能力从而满足他们的生活需求。国内外研究的智能助行设备多种多样,例如:机器人假肢^[7-8]、可穿戴外骨骼机器人^[9-10]、移动助行器式助行机器人^[11-38]。对于残疾人来说,由不同原因导致不同程度上的行走/活动能力变弱或丧失的人群需要不同的功能辅助。参考中国残疾人实用评定标准,视力残疾的患者需要设备在日常生活中给予引导。重度(一级)肢体残疾的患者完全不能或基本上不能完成日常生活活动,针对这类人群设计的智能轮椅、智能假肢^[7-8]、可穿戴式外骨骼机器人^[9-10]可以代偿他们日常活动功能,进而能够帮助他们的活动需求。中度(二级)和轻度(三级)肢体残疾的患者能够部分完成日常生活活动甚至基本上能够完成日常生活活动,则在日常行走活动中仅需辅助支撑。助步架式助行器机器人^[11-38]、拐杖机器人^[39-44]更适合这类人群的使用。

因此,根据实际应用情况对智能移动式助行器(intelligent mobile walking-aid)进行归纳总结,智能助行器是指在使用者长时间的移动行走过程中能够提供导航避障、行走辅助支撑的一类移动式机器人,部分机器人形态上类似于传统助行设备中助步架、拐杖。智能助行器可以针对不同环境情形下的助行需求,通过不同的功能实现对使用者给予不同的助行援助。目前,在全世界范围内,相关研究在智能化方面已经取得了大量优秀、成熟的成果。如图 2 所示,根据功能将现有的智能助行器可以分为两大类:(1) 针对具有一定行走能力但视力较弱的人群,以导航避障功能为主的移动式导盲机器人;(2) 在日常行走或康复训练中提供物理辅助支撑的移动式助行机器人。

第一类助行机器人普遍具有主动或从动的移动底盘结构,且具有在识别行走过程中能够识别周围一定空间范围内障碍物的功能,可以规划行进路径指引使用者避开障碍物,或者根据地图信息指引使用者到达目的地。Lacey 等^[11]设计出帮助视弱人

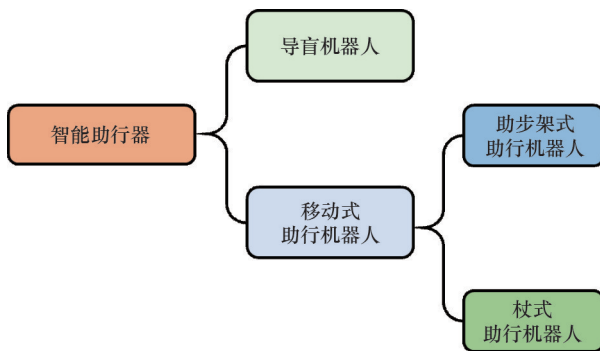


图 2 智能助行器分类

Fig. 2 The categories of intelligent mobile walking-aids

群及老人在行走中躲避障碍物的移动机器人 PAM-AID; Mori 等^[12-13]设计机器人移动辅助(robotic travel aid)系统 HITOMI 和 HARUNOBU-6,该系统加装有视觉系统、声纳、差分 GPS 系统、航位推算系统和便携式 GIS 等,可以通过地图信息为用户提供导航,从而帮助盲人进行户外活动^[14]。Shoval 和 Shim 等分别研发两款机器人 Guide Cane^[15]和 ROJI^[16],主要为盲人提供导航避障功能。

第二类助行机器人外观与传统助行器(助步架、拐杖)类似,有可移动底盘和便于使用者抓握的扶手及支撑架,可以为行走能力较弱的老年人或残疾人群在行走时提供辅助支撑。

在这类助行器式助行机器人中也可以根据结构分为两类,一类是结构与传统助步架类似的助行机器人;另一类是结构与拐杖类似的助行机器人。这两类助行器式助行机器人可以感知使用者的期望运动并跟随使用者同步移动,且通过扶手及支撑架为使用者提供稳定的支撑。随着科学技术的发展,这些助行器式助行机器人不再单一地提供辅助支撑功能,开始逐渐满足使用者日常行走或康复训练中的多样化需求,例如,在行走开始和结束时辅助使用者的“起”“坐”姿态转换、导航避障、记录使用者行走数据以及跌倒防护等功能。

有关助步架式杖式助行机器人, Schaeffer 等^[17]针对老年人、残疾人群研发了 Care-o-bot 智能助行机器人系统; Nemoto 等^[18-19]针对老年人日常活动中的姿态转换,如站立、行走、蹲起等活动设计了 PAWSS 行走辅助系统(power-assisted walking sup-

port system)。麻省理工学院的 Dubowsky 等^[20-21]研制了 PAMM(personal aid for mobility and monitoring)智能助行器,旨在为老年人独立生活提供帮助。除了提供行走辅助支撑功能,该系统还能监测用户的基本生命体征。Wasson 等^[22]开发了一种智能三轮助行器(personal mobility aid),此智能助行器上加装红外传感器和激光测距仪等,保证使用者能够在运动中躲避障碍物。2004 年,日本研发了一种被动式的助行机器人 RT-Walker,通过适当的调节两个伺服刹车系统的控制来控制机器人的运动,还具备防跌倒的功能^[23]; Kai 等^[24]设计了一种智能助行器,在提供助行功能的同时检测使用者是否有跌倒状态。2005 年韩国理工大学的 Shim 等^[25]研发了一种基于激光测距仪、CCD 摄像机和 GPS 接收器的智能助行器 WAR(walking assistant robot),用户通过搭载了触觉传感器地扶手操作即可驱动助行器进行舒适地行走。此助行器在室外环境下还具有路径引导功能。2006 年,北京理工大学研发了一款助行系统 ARSD(assistant robot with standing-up devices)^[26]。Lacey 等^[27]开发的盲人助行机器人 Guido 愈发完善,它同样具有即时定位与地图构建(SLAM)的功能,并能够基于地图进行导航。文献[28]设计了一种被动式的全向移动助行机器人 ORTW-II。美国弗吉尼亚大学为下肢力量弱的老年人群设计了一种三轮智能助行器^[29]。2010 年法国 INRIA 研究中心 Merlet 等^[30]研发了一中低成本的助行器 ANG,能够提供预防跌倒、导航、行走辅助等功能。

2010 年,浙江大学也研发了一款智能助行器 ZJU Walker^[31]。2011 年,华中科技大学研制了一种低成本、宽度可变的智能助行器(图 3),是由支撑架、宽度可调的移动基座和传感器阵列组成^[32]。台湾大学研发了一款智能助行器 CAIROW(Context-aware Assisted Interactive Robotic Walker)^[33]。Miyake 等研发了一款助行机器人 Walkmate^[34],该智能助行器基于力传感器的人-机交互接口辅助使用者进行行走。华中科技大学与国家康复辅具研究中心研究了一款助行康复机器人样机(图 4),具有基于力传感器的人-机交互接口,同时也可基于



图 3 宽度可变智能助行器

Fig. 3 The width-changeable intelligent walking-aid robot



图 4 国康和华中科大智能助行机器人

Fig. 4 HUST walking-aid robot

人工势场法和紧急避障控制策略的共享控制方法为使用者规划安全路径。这种助行机器人与台湾交通大学研发的智能助行器^[35]和日本北陆先端科学技术大学(JAIST)设计的助行机器人 JARoW^[36]属于一类具有全向移动底盘助行机器人,均能够完成上下坡等环境的助行功能。此外,在文献[37]和[38]的研究中,针对下肢肌力弱的人群,设计了姿态转换的助行机器人,应用了基于力交互的意图提取和柔顺控制算法,除了能够在行走过程中提供支撑功能外,也能帮助使用者在行走开始和结束时完成“坐-站”“站-坐”的姿态转换(图 5)。

助步架式的助行机器人一般体积较大、质量较重,对于活动环境有一定的要求限制,而体积小巧的杖式助行机器人能够通过狭小的通道,使用环境

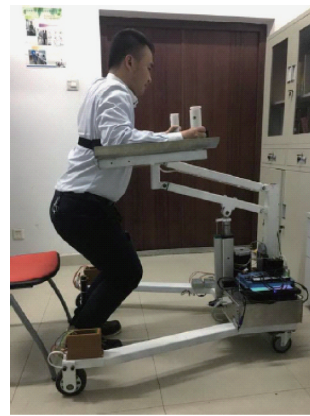


图 5 辅助坐姿、站姿转换的康复助行系统

Fig. 5 The instrumented walker

自由多样,能够满足是使用者在不同活动环境中进行行走的日常需求。杖式助行机器人^[39-41]搭载了六轴力传感器、激光测距仪等传感器,底盘为全向移动底盘,如图 6、图 7 所示。这些助行机器人能够根据力传感器测得的使用者交互力信息,提取使用者的运动意图,辅助使用者进行行走,并具有跌倒检测功能,也能够基于通过杆连接处关节的最优姿态控制实现使用者的跌倒防护。

智能助行器的研究和推广应用有望有效缓解单一的传统助行器功能与多样的患者需求之间的矛盾,减少患者在行走时的能量消耗,帮助他们更加轻松、自由地行走,提高残疾患者的生活质量,并带动相关产业发展,增加就业,促进社会和谐,因而具有重要的社会意义。

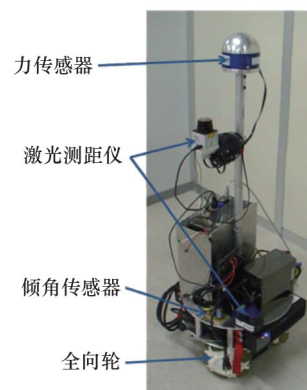


图 6 日本名古屋大学 杖式助行机器人

Fig. 6 Nagoya University Cane robot

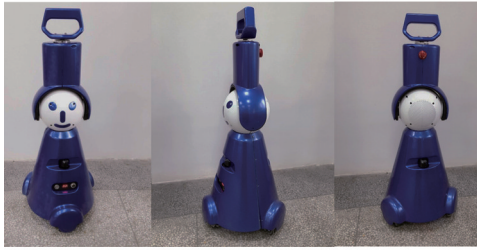


图7 华中科技大学杖式助行机器人

Fig. 7 HUST Cane robot

2 智能助行器的感知、交互与控制

为帮助残疾人行走、提供舒适的使用体验,智能助行器需要感知使用者的运动状态。“如何了解使用者的行走的期望速度与方向、行走趋势和行走状态,并与使用者进行交互,同时基于这些信息完成助行器的运动控制,且协助使用者完成行走动作?”是智能助行器在辅助行走中面临的系列挑战。智能助行器的感知系统可以识别使用者及助行器当前的状态、行走环境等信息。助行器再通过交互系统完成与使用者的沟通,最后通过控制系统完成运动规划,实现助行功能。

2.1 智能助行器的感知

智能助行器的感知系统由传感器及感知算法构成。目前根据感知系统的信息来源:环境信息、助行器运动状态、使用者意图、使用者运动状态,可以将智能助行器的感知系统分为基于视觉信息的感知、基于运动信号的感知及基于生理电信号的感知^[42]。

2.1.1 基于视觉信息的感知

对于视力障碍的残疾患者来说,他们无法通过自身的视觉获取环境信息,这给他们的正常行走带来了极大的不便。因此,智能助行器上基于视觉信息的感知系统是至关重要的。智能助行器可以通过所搭载的视觉传感器获取环境信息,识别并判断出行走活动环境中的障碍物^[43],从而规划正确的运动路径,引导使用者行走。智能助行器也可以分析视觉传感器获取的人体运动图像,利用从记录的运动图像提取的人体运动特征来判断人体的运动状

态。Molton 等^[44]提出了一种基于视觉的方法探测环境信息从而帮助视力残疾患者行走。文献[45-48]也提出了基于视觉传感器的方法检测人体的运动状态。

2.1.2 基于运动信号的感知

基于运动信号的感知主要是通过检测使用者肢体及助行器的运动角度、速度、位置、力等信号判断使用者及助行器的运动趋势和状态。位移传感器、惯性测量单元(IMU)、加速度计等传感器可以检测位置、角度、加速度等运动信号。当使用者进行不同的动作时,使用者身上装备的可穿戴传感器设备也会发生相应的物理量变化,导致检测变量也发生相应的变化,从而得到使用者当前的运动状态^[49-52]。文献[49]设计了一种无线可穿戴传感器系统,并可以实时实现姿态识别和室内定位。文献[50]和[51]均利用新型材料设计了一种可拉伸应变传感器,用于人体的运动检测。文献[52]结合了无线可穿戴传感器与智能助行器系统,用于检测使用者的异常状态。同理可以通过安装在助行器上的位移传感器、倾角传感器等检测出助行器移动的位置及倾斜的角度等信息。另外,可以通过电阻应变式传感器、压阻式传感器、六轴力矩传感器、触觉传感器等检测使用者与智能助行器之间的交互力。由于使用者的需要辅助支撑的程度不同,使用者与助行器的接触方式也不相同,导致测量交互力的传感器位置不尽相同。在杖式助行机器人的研究中^[39-41],力矩传感器安装在杖式扶手的下方;在助步架式助行机器人的研究^[32,37]中,电阻、压阻式传感器安装在手握杆的四周或前臂支撑架的下方,从而测出使用者的行走力意图和起坐力意图。

2.1.3 基于生理电信号的感知

基于生理电信号的感知主要是通过各种侵入式和非侵入式的生理电信号采集装置^[53-55],例如MEMS微针阵列干电极等设备采集使用者的生理电信号^[53]。不同的运动状态会导致和人体行为相关的神经脉冲激发的电位产生变化,利用生理电信号相关的电位信息可以分析出生理电信号与运动之间的相关性,进而分析出使用者的运动状态。在基于生理电信号的感知系统中常用的信号来源有

脑电波 (electroencephalogram, EEG)、肌电图 (electromyogram, EMG) 记录的肌电信号、眼电图 (electrooculography, EOG) 记录的电信号等。使用植入式的生理信号采集装置时需要接受相关的医学的培训和指导, 此技术相对困难, 而非植入式的生理信号采集装置的电极仅需置于皮肤表层, 操作简单并且不留伤口。基于生理电信号的运动状态检测和预测及运动控制都在快速发展, 文献[56]提出了一种基于 EEG 信号的自适应共享控制算法, 文献[57]和[58]针对虚拟的智能助行器设计了基于 EEG 信号的脑-机接口, Li 等^[59]研究了实际环境中基于 EEG 信号设计的利用稳态视觉诱发电位的新型智能助行器的脑-机接口。许多机器学习算法应用于生理电信号解码分类, 如线性判别分析具有非常低的计算要求, 使其适用于在线脑-机交互系统^[60-61]、支持向量机^[62]、神经网络^[63-64]和贝叶斯框架^[65], 利用大量生理电信号解码出的不同特征判断出生理电信号不同电位动作相关的人体运动状态/趋势。

2.1.4 感知算法

感知算法除了获取使用者及助行器的运动状态外, 还涉及到使用者的运动意图的获取。在不同的助行器研究中, 对运动意图具有不同的定义。一般而言运动意图可以用使用者运动的期望位置、期望速度、期望方向来描述。目前在运动意图领域的研究已有很多丰富的成果。文献[66]提出了关于获取力意图的研究则是通过放置于智能助行器的扶手处的六轴力传感器来获取使用者与助行器在运动过程中的力信号, 利用卡尔曼滤波估计出使用者意图运动方向及意图运动速度的大小。文献[67]中提出了基于控制效率的意图估计方法。文献[68]提出的一种运动意图获取方法是将运动意图状态视为一个随机过程, 从而用隐马尔科夫模型来估计运动意图。文献[31]基于 ZJU walker 提出了 3D 意图空间描述, 其包括方向意图、步速意图和旋转意图。文献[69]通过力矩传感器获取的人与机器人的交互力, 利用人类上肢的阻尼弹簧模型并基于 RBFNN 提取协同工作中的期望运动轨迹作为运动意图。运动意图作为智能助行器的控制

输入, 智能助行器可以根据运动意图计算出的应有的运动速度进行运动, 从而帮助使用者进行行走。文献[70]通过穿戴的非侵入式的获取肌肉电信号来判断使用者的运动意图, 从而令助行器进入对应行走辅助模式。此外, 考虑到人体自身运动上下肢的协调性, 文献[71]提出了一种基于多传感器的意图融合算法, 融合从使用者上肢获取的力意图及从激光传感器获得的使用者下肢运动意图, 估计出更为光滑的运动意图。文献[72]提出了一种基于上下肢协调规律的意图融合算法, 用来估计更加贴近真实运动的运动意图。

2.1.5 讨论

与基于运动信号的感知相比, 由于生理电信号的变化发生先于肌肉动作反应, 因此可以基于生理电信号提前感知动作的发生。然而, 生理电信号的采集设备昂贵, 且需要经过专业培训后使用, 不便于在日常生活使用。所以, 生理电基于信号的感知更适用于运动状态无法从运动中探测到的患者, 例如患有肌无力、脊柱无力等脊髓损伤或完全丧失能力, 必须依靠外骨骼^[10]或智能轮椅^[59], 而不是智能助行器的患者。基于运动信号的感知方法相对便宜, 广泛应用于大多数智能助行器。

2.2 智能助行器的交互

在使用者使用智能助行器的过程中, 智能助行器与使用者之间以一定的交互方式通过一定的接口, 为完成助行功能进行信息交换。在人-机交互方式中, 常见的是触觉/力交互方式^[29, 33, 40]、基于生理电信号的交互等交互方式^[53-55]、语音交互方式^[73]、手势交互^[74]。

触觉/力交互中, 使用者在意图方向上产生力意图, 研究均为依赖于触觉/力交互方式的助行器, 在此交互方式中, 感知人的期望力的强度和人的期望力方向, 对人的意图进行建模, 从而获取使用者运动意图, 从而让机器人相应地做出反应^[29, 33, 40]; 在语音交互中, 使用者可以通过语音方式对机器人发出命令, 机器人也能通过振动提示或者语音回复将状态反馈给使用者, Nehal 等^[75]及 Walvekar 等^[76]为视觉障碍的人群设计了通过语音交互的智能助行器。基于生理电信号的交互方式一般用于肢体末

端缺失或者力量不足以表达运动意图、使用者完全丧失行动能力的情况^[77-78]。

2.3 智能助行器的控制

在当前智能助行器的控制方法研究中,大多基于感知系统获取的运动意图,对机器人进行位置控制、力控制、力/位混合控制、基于生理电信号的控制。

在位置控制方法里面,通过感知系统获取的运动意图信号或依据活动要求设定的运动轨迹,通过控制助行器的实际位置与期望的运动位置的误差不断收敛,从而使得助行器能够支撑使用者在预期的活动方向上运动。Zhang 等^[79]研究的助行机器人能够通过轨迹跟踪控制保证助行机器人能够按照预期设定的轨迹运动。

在力控制里面,在华中科技大学^[37]及韩国 LG 公司^[38]的研究中都针对一类起坐辅助及助行机器人进行了控制算法设计,Yang 等^[37]提取出了使用者的手掌、前臂与机器人的交互力,从而准确判断使用者的行走意图和起坐意图,进而辅助使用者进行起-坐姿态转换及行走。在力/位混合控制中,一般依赖于期望位置与实际位置的偏差以及期望交互力与实际交互力的偏差对智能助行器进行控制,从而使得智能助行器在能够满足助行器运动位置和人机交互力都符合预期的条件下辅助使用者行走。文献[39]提出了基于全向拐杖机器人辅助使用者进行行走的动态意图导纳模型与在线意图提取估计算法,从而保证助行机器人能够基于力意图按照使用者的意愿进行相应的运动控制。Di 等^[80]在拐杖助行机器人上应用了结合基于意图的导纳控制及基于阻抗的柔顺控制,保证了助行功能的有效性及其助行过程中的安全性,从而为使用者提供方便、舒适的使用体验。

此外,也有许多关于人-机协同、人-机共享控制和结合强化学习的助行器控制研究。Hirata 等^[81]针对 RT-Walker 的使用提出了一种人体自适应运动控制算法以及一种基于环境信息提供障碍物/台阶避障和重力补偿功能的环境自适应运动控制算法。Xu 等^[82]考虑到使用者学习、适应使用助行机器人的时间成本,设计了一种基于强化学习的

共享控制方法,根据使用者的控制效率和当前的行走环境状态的障碍物分布情况,通过强化学习方法在线调节使用者对助行器控制的权重,通过共享控制方法合成使用者意图行走速度和助行机器人规划的运动速度,从而使得整体的控制既能顺应使用者的运动意图,又能够保障使用者安全避开障碍物,进而提高使用者的运动表现。西安交通大学将模糊控制应用在了助行器上,用于判断使用者的运动意图及助行器的运动模式^[83]。徐文霞等^[84]基于多传感器融合设计了兼具柔顺性与安全性的助行机器人控制方法能够得到更加准确、更加柔顺的用户意图速度,在检测到即将跌倒时,则紧急制动机器人,防止用户跌倒,保证用户的安全。由于系统采集运动数据、处理数据的时间滞后会导致控制的实时性产生偏差,生理电信号的控制方法可以在响应的肢体运动响应前预判运动意图,可以有效地部分弥补运动数据的滞后性。然而,对于大脑运动功能损伤的患者,不能够提取出正常的肢体运动相关的 EEG 信号^[85]。

若基于结合有效的生理电信号及人机交互力、肢体运动信号等多信号融合的控制算法,能够更加准确、实时地辅助使用者进行行走运动,为使用者提供更好地行走体验。

3 智能助行器的安全性

智能助行器为使用者提供直接接触的辅助支撑,因此助行器的安全性对于保障使用者的安全尤为重要。

智能助行器的安全性涉及到多个方面。首先在机械结构设计方面需要保证设计上没有缺陷。同时,考虑到残疾人腿脚不便时会倚靠在助行器上,设计出的机械结构要保证自身有一定的抗倾覆性,且易于使用者操作。此外,考虑到助行机器人与受用者之间的交互力不能超出安全范围,在与使用者接触的位置最好采用柔性接触或者减震材料,减少机器人与使用者之间碰撞的冲击力^[86-87]以提供更好的使用体验。Yamada^[88]提出了一种基于人类疼痛耐受性的面向人类安全的机器人设计策略,

Tejima^[89]提出了一种基于机械装置来限制交互力的大小。

其次,在硬件设计方面要保证硬件系统元器件的可靠性与冗余性。同时紧急开关通常作为基于硬件的安全装置被广泛使用。

另外,通过软件系统的设计也能够提升智能助行器的安全性,尤其是通过控制策略中的异常状态监测及预防能够帮助智能助行器在检测到使用者或自身的异常状态后及时反应,保障使用者的安全。在这一方面,Ikuta 提出了一种通用方法来定量评价每种安全策略的有效性^[90],众多研究者研究了环境中存在障碍物的情况下,对助行机器人进行了避障功能设计^[20,25,27,91-93]。

在跌倒检测和防护方面,文献[52]为智能助行器的使用者提供了一种可穿戴传感器设备,此设备可以检测出使用者的身体运动和位置,并参考腰部的高度以及 COP 与使用者的脚的中点之间的距离等信息基于模糊阈值的方法在线检测使用者的跌倒事故。徐文霞等^[84]也提出了兼具柔顺性与安全性的助行机器人控制方法来保障使用者的安全性。Kai 等^[94]提出了用压力传感器、LED 传感器和力传感器来检测跌倒的方法,Hirata 等^[95]研究了一种基于两个激光测距仪来检测人体跌倒的方法,并在文献[96]提出了一种将人体作为刚体模型建模来估计跌倒状态方法,并依据此方法设计了一种跌倒防护策略。文献[97]基于助行机器人上搭载的基于扭矩、速度、接触力的安全装置,设计了一种安全保护策略。全向杖式助行机器人基于全景相机和激光测距仪的信息数据能够实现基于视觉的跌倒检测方法^[98],Di 等^[99-101]研究了多种基于 COP、ZMP 的跌倒检测方法,用于检测使用者在使用助行机器人过程中发生的跌倒动作趋势。当智能助行器检测到使用者发生跌倒趋势后,一般会立即刹车并停止运动动作,而文献[99]在检测到使用者产生跌倒趋势后控制拐杖机器人的关节移动到的期望安全位置,从而阻止使用者的跌倒趋势,此方法考虑到跌倒后的相互作用的柔顺行和人-机系统的稳定性,可以给使用者带来安全、舒适的使用体验。Hasegawa 等^[102]针对使用智能助行器的老年人

可能出现地剪刀脚步态进行预防,从而保障使用者的安全。Yan 等^[103]提出了一种基于数据驱动和人-机协同及身体自身协调规律的人体行走状态检测方法,可以判断使用者的正常行走、关节锁定、翘翘等不同行走状态。

除了检测使用者的异常状态,也有学者对于在助行过程中助行器本身出现异常状态的紧急情况进行了研究。Sun 等^[104]基于非线性冗余输入方法,设计了一种渐进稳定的控制器,既能在助行器的单轮执行机构故障时保证使用者的安全,又能保证智能助行器依旧跟踪医师规划的行走训练路径。

4 结论

目前,智能助行器的研究正处于快速发展的阶段,大部分智能助行器均处于样机研制或试验阶段,智能助行器位置用着提供行走辅助的功能经过了志愿者实验验证,但有能够在多大程度上帮助患者则待更多医学临床实验验证。除此之外,智能助行器的研究仍存在一些亟待解决的科学问题。一方面,在意图估计方面,需要进一步提出更贴近真实运动期望的意图估计算法。智能机器人将运动意图当作控制输入,且根据用户的运动意图计算合适的速度。在目前运动意图估计的研究中,为了获得更接近真实运动趋势的运动意图,采用了基于多传感器的意图融合方法。基于多传感器的融合方法基于滤波方法得到融合上肢和下肢获得的运动意图。这些融合算法已被证明在一定程度上是可行的。然而,四肢运动意图与全身运动意图之间的关系并不是简单地通过滤波得到的映射关系。此外,目前的融合方法多用于直线行走,但如果在行走过程中有行走状态的转变(如从直行到转弯的切换),基于滤波算法的融合方法不能预测这种变化。因此,应该拓展研究不同行走状态和状态转换下的意图融合估计方法。另一方面,在安全性方面,尚未研究出一种针对全向方向跌倒动作的柔顺、有效防护方法。目前的跌倒防护研究的防护效果有限,仅对几个特定方向的跌倒有效。如果使用者跌倒动作幅度很大,智能助行器也会因为人机交

互力而倾覆,从而给使用者带来危险。因此在跌倒防护功能中需要考虑跌倒防护的全向性、柔顺性和有效性。

当然,上述亟待解决的科学问题不够详尽,智能助行器的日常应用中也可能存在其他问题,上述列举的例子只是为未来的研究提供了建议。智能助行器的研究作为交叉学科的研究,自然也面临着新技术碰撞与融合。在智能助行器的外观设计方面,当新型高强度、轻质量的材料应用在智能助行器上时,助行器的设计会更加简单、结构会更加轻便,同时也会更加符合康复助行的“按需援助^[105]”理念。此外,在安全性方面,关于智能助行器的安全标准也将有统一的规划,智能助行器的可靠性会逐步提高。随着人-机交互领域的逐渐发展,人工智能领域的研究热点,例如:强化学习^[106]、深度学习^[107]、“人在环中^[108-109]”等研究也将在智能助行器上广泛应用,会带来意图识别更加准确、人-机协同程度更高、控制更加精确的控制策略与方法,为残疾人群带来更好、更舒适地使用体验。

参考文献(References)

- [1] 世界卫生组织. 世界残疾报告[EB/OL]. [2018-12-14]. https://www.who.int/disabilities/world_report/2011/report/zh.
- [2] 崔斌, 陈功, 郑晓瑛. 中国残疾人口致残原因分析[J]. 人口与发展, 2009(5): 51-56.
- [3] 赵燕潮. 中国残联发布我国最新残疾人口数据[J]. 残疾人研究, 2012(A01): 11.
- [4] 义肢[EB/OL]. [2018-04-13]. <https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=E7%BE%A9%E8%82%A2&oldid=49126048>.
- [5] 十一五规划[EB/OL]. (2018-11-23)[2018-12-14]. <https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E5%8D%81%E4%B8%80%E4%BA%94%E8%A7%84%E5%88%92&oldid=52127177>.
- [6] 十二五规划[EB/OL]. (2018-09-25)[2018-12-14]. <https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E5%8D%81%E4%BA%8C%E4%BA%94%E8%A7%84%E5%88%92&oldid=51414721>.
- [7] Chan A, Kwok E, Bhuanantanondh P. An assessment platform for upper limb myoelectric prosthesis[C]//CMBES Proceedings. Ottawa: CMBES, 2018.
- [8] Lei M, Wang Z Z. The study advances and prospects of processing surface EMG signal in prosthesis control[J]. Chinese Journal of Medical Instrumentation, 2001, 25(3): 156-160.
- [9] Lee S, Sankai Y. Power assist control for walking aid with HAL-3 based on EMG and impedance adjustment around knee joint[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2002. Piscataway NJ: IEEE, 2002, 2: 1499-1504.
- [10] Khokhar Z O, Xiao Z G, Menon C. Surface EMG pattern recognition for real-time control of a wrist exoskeleton [J]. Biomedical Engineering Online, 2010, 9(1): 41.
- [11] O'Neill A, Petrie H, Lacey G, et al. Establishing initial user requirements for PAM-AID: A mobility and support device to assist frail and elderly visually impaired persons[M]//Improving the Quality of Life for the European Citizen. Clifton VA: IOS Press, 1998: 292-295.
- [12] Mori H, Kotani S, Kiyohiro N. A robotic travel aid "HITOMI"[C]//Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'94). Piscataway NJ: IEEE, 1994, 3: 1716-1723.
- [13] Mori H, Kotani S. A Robotic Travel Aid for the Blind [M]//Robotics Research. London: Springer, 1998: 237-245.
- [14] Kotani S, Nakata T, Hideo M. A strategy for crossing of the robotic travel aid "Harunobu"[C]//2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2001. Piscataway NJ: IEEE, 2001, 2: 668-673.
- [15] Shoal S, Ulrich I, Borenstein J. NavBelt and the GuideCane[J]. IEEE Robotics and Automation Magazine, 2003, 10(1): 9-20.
- [16] Shim I, Yoon J. A human robot interaction system "RoJi" [C]//2003 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 2003. Piscataway NJ: IEEE, 2003, 2: 723-728.
- [17] Schaeffer C, May T. Care-bot-a system for assisting elderly or disabled persons in home environments[C]//Proceedings of the 24th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Piscataway NJ: IEEE, 1998, doi: 10.1109/IECON.1998.724115.
- [18] Nemoto Y, Egawa S, Koseki A, et al. Power-assisted walking support system for elderly[C]//Proceedings of the 20th Annual International Conference of the IEEE.

- Piscataway NJ: IEEE, 1998, 5: 2693-2695.
- [19] Egawa S, Nemoto Y, Fujie M G, et al. Power-assisted walking support system with imbalance compensation control for hemiplegics[C]//Proceedings of the First Joint BMES/EMBS Conference, 1999. Piscataway NJ: IEEE, 1999, 1: 635.
- [20] Wasson G, Gunderson J, Graves S, et al. An assistive robotic agent for pedestrian mobility[C]//Proceedings of the Fifth International Conference on Autonomous Agents. New York: ACM, 2001: 169-173.
- [21] Dubowsky S, Genot F, Godding S, et al. PAMM-A robotic aid to the elderly for mobility assistance and monitoring: A "helping-hand" for the elderly[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2000. Piscataway NJ: IEEE, 2000, 1: 570-576.
- [22] Yu H, Spenko M, Dubowsky S. An adaptive shared control system for an intelligent mobility aid for the elderly [J]. *Autonomous Robots*, 2003, 15(1): 53-66.
- [23] Hirata Y, Hara A, Kosuge K. Passive-type intelligent walking support system "RT Walker"[C]//2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2004. Piscataway NJ: IEEE, 2004, 4: 3871-3876.
- [24] Kai Y, Tanioka T, Inoue Y, et al. A walking support/evaluation machine for patients with parkinsonism[J]. *The Journal of Medical Investigation*, 2004, 51(1-2): 117-124.
- [25] Shim H M, Lee E H, Shim J H, et al. Implementation of an intelligent walking assistant robot for the elderly in outdoor environment[C]//9th International Conference on Rehabilitation Robotics, 2005. Piscataway NJ: IEEE, 2005: 452-455.
- [26] Xiong G, Gong J, Gao J, et al. Optimum design and simulation of a mobile robot with standing-up devices to assist elderly people and paraplegic patients[C]//IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 2006. Piscataway NJ: IEEE, 2006: 807-812.
- [27] Lacey G J, Rodriguez-Losada D. The evolution of guide [J]. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 2008, 15(4): 75-83.
- [28] Nejatbakhsh N, Kosuge K. User-environment based navigation algorithm for an omnidirectional passive walking aid system[C]//9th International Conference on Rehabilitation Robotics, 2005. Piscataway NJ: IEEE, 2005: 178-181.
- [29] Alwan M, Rajendran P J, Ledoux A, et al. [C]//Proceedings of AAAI Symposium. 2005.
- [30] Merlet J P. Preliminary design of ANG, a low-cost automated walker for elderly[M]//New Trends in Mechanism Science. Dordrecht: Springer, 2010: 529-536.
- [31] Zhou W, Xu L, Yang J. An intent-based control approach for an intelligent mobility aid[C]//2nd International Asia Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (CAR 2010). Piscataway NJ: IEEE, 2010, 2: 54-57.
- [32] Ye J, Huang J, He J, et al. Development of a width-changeable intelligent walking-aid robot[C]//2012 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science (MHS). Piscataway NJ: IEEE, 2012: 358-363.
- [33] Mou W H, Chang M F, Liao C K, et al. Context-aware assisted interactive robotic walker for parkinson's disease patients[C]//2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Piscataway NJ: IEEE, 2012: 329-334.
- [34] Takanashi H, Miyake Y. Co-emergence robot Walk-Mate and its support for elderly people[J]. *Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers*, 2003, 39(1): 74-81.
- [35] Jiang S Y, Lin C Y, Huang K T, et al. Shared control design of a walking-assistant robot[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2017, 25(6): 2143-2150.
- [36] Lee G, Ohnuma T, Chong N Y. Design and control of JAIST active robotic walker[J]. *Intelligent Service Robotics*, 2010, 3(3): 125-135.
- [37] Yang D, Zhou M, Huang J, et al. Aided sit to stand transfer by assistive robot and wearable sensors[C]//2nd International Conference on Advanced Robotics and Mechatronics (ICARM), 2017. Piscataway NJ: IEEE, 2017: 239-244.
- [38] Jun H G, Chang Y Y, Dan B J, et al. Walking and sit-to-stand support system for elderly and disabled[C]//2011 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR). Piscataway NJ: IEEE, 2011: 1-5.
- [39] Huang J, Di P, Fukuda T, et al. Motion control of omnidirectional type cane robot based on human intention [C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2008. Piscataway NJ: IEEE, 2008: 273-278.
- [40] Di P, Huang J, Sekiyama K, et al. Motion control of in-

- telligent cane robot under normal and abnormal walking condition[C]//RO-MAN, 2011 IEEE. Piscataway NJ: IEEE, 2011: 497-502.
- [41] Yan Q, Huang J, Luo Z. Human-robot coordination stability for fall detection and prevention using cane robot [C]//2016 International Symposium on Micro-Nano Mechatronics and Human Science (MHS). Piscataway NJ: IEEE, 2016: 1-7.
- [42] 侯增广, 赵新刚, 程龙, 等. 康复机器人与智能辅助系统的研究进展[J]. 自动化学报, 2016, 42(12): 1765-1779.
- [43] Lionis G S, Kyriakopoulos K J. A laser scanner based mobile robot SLAM algorithm with improved convergence properties[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2002. Piscataway NJ: IEEE, 2002, 1: 582-587.
- [44] Molton N, Se S, Brady J M, et al. A stereo vision-based aid for the visually impaired[J]. Image and Vision Computing, 1998, 16(4): 251-264.
- [45] Moeslund T B, Granum E. A survey of computer vision-based human motion capture[J]. Computer Vision and Image Understanding, 2001, 81(3): 231-268.
- [46] Dalal N, Triggs B, Schmid C. Human detection using oriented histograms of flow and appearance[C]//European Conference on Computer Vision. Berlin, Heidelberg: Springer, 2006: 428-441.
- [47] Liu H, Dong N, Zha H. Omni-directional vision based human motion detection for autonomous mobile robots [C]//2005 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Piscataway NJ: IEEE, 2005, 3: 2236-2241.
- [48] Mehta D, Sridhar S, Sotnychenko O, et al. Vnect: Real-time 3d human pose estimation with a single rgb camera [J]. ACM Transactions on Graphics, 2017, 36(4): 44.
- [49] Huang J, Yu X, Wang Y, et al. An integrated wireless wearable sensor system for posture recognition and indoor localization[J]. Sensors, 2016, 16(11): 1825.
- [50] Ryu S, Lee P, Chou J B, et al. Extremely elastic wearable carbon nanotube fiber strain sensor for monitoring of human motion[J]. ACS Nano, 2015, 9(6): 5929-5936.
- [51] Park J J, Hyun W J, Mun S C, et al. Highly stretchable and wearable graphene strain sensors with controllable sensitivity for human motion monitoring[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2015, 7(11): 6317-6324.
- [52] Huang J, Xu W, Mohammed S, et al. Posture estimation and human support using wearable sensors and walking-aid robot[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2015, 73: 24-43.
- [53] Prutchi D. A high-resolution large array(HRLA) surface EMG system[J]. Medical Engineering & Physics, 1995, 17(6): 442-454.
- [54] Lin C T, Liao L D, Liu Y H, et al. Novel dry polymer foam electrodes for long-term EEG measurement[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2011, 58(5): 1200-1207.
- [55] Supuk T G, Skelin A K, Cic M. Design, development and testing of a low-cost sEMG system and its use in recording muscle activity in human gait[J]. Sensors, 2014, 14(5): 8235-8258.
- [56] Gandhi V, Prasad G, Coyle D, et al. EEG-based mobile robot control through an adaptive brain-robot interface [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2014, 44(9): 1278-1285.
- [57] Leeb R, Friedman D, Müller-Putz G R, et al. Self-paced (asynchronous) BCI control of a wheelchair in virtual environments: A case study with a tetraplegic[J]. Computational Intelligence and Neuroscience, 2007, doi: 10.1155/2007/79642.
- [58] Huang D, Qian K, Fei D Y, et al. Electroencephalography (EEG)-based brain-computer interface(BCI): A 2-D virtual wheelchair control based on event-related desynchronization/synchronization and state control[J]. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 2012, 20(3): 379-388.
- [59] Li Z, Zhao S, Duan J, et al. Human cooperative wheelchair with brain-machine interaction based on shared control strategy[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2017, 22(1): 185-195.
- [60] Bostanov V. BCI competition 2003-data sets Ib and IIb: Feature extraction from event-related brain potentials with the continuous wavelet transform and the t-value scalogram[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2004, 51(6): 1057-1061.
- [61] Scherer R, Muller G R, Neuper C, et al. An asynchronously controlled EEG-based virtual keyboard: Improvement of the spelling rate[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2004, 51(6): 979-984.
- [62] Kaper M, Meinicke P, Grossekhoefer U, et al. BCI competition 2003-data set IIb: Support vector machines for the P300 speller paradigm[J]. IEEE Transactions on

- Biomedical Engineering, 2004, 51(6): 1073–1076.
- [63] Garrett D, Peterson D A, Anderson C W, et al. Comparison of linear, nonlinear, and feature selection methods for EEG signal classification[J]. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 2003, 11(2): 141–144.
- [64] Schlögl A, Lee F, Bischof H, et al. Characterization of four-class motor imagery EEG data for the BCI-competition 2005[J]. Journal of Neural Engineering, 2005, 2(4): L14.
- [65] Chiappa S, Bengio S. HMM and IOHMM modeling of EEG rhythms for asynchronous BCI systems[R]. IDIAP, 2003.
- [66] Wakita K, Huang J, Di P, et al. Human-walking-intention-based motion control of an omnidirectional-type cane robot[J]. IEEE/ASME Transactions On Mechatronics, 2013, 18(1): 285–296.
- [67] Erden M S, Tomiyama T. Human-intent detection and physically interactive control of a robot without force sensors[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2010, 26(2): 370–382.
- [68] Wang Z, Peer A, Buss M. An HMM approach to realistic haptic human-robot interaction[C]//EuroHaptics Conference, 2009 and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems. Piscataway NJ: IEEE, 2009: 374–379.
- [69] Li Y, Ge S S. Human-robot collaboration based on motion intention estimation[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2014, 19(3): 1007–1014.
- [70] Kiguchi K, Hayashi Y. An EMG-based control for an upper-limb power-assist exoskeleton robot[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics), 2012, 42(4): 1064–1071.
- [71] Yan Q, Xu W, Huang J, et al. Laser and force sensors based human motion intent estimation algorithm for walking-aid robot[C]//2015 IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems(CYBER). Piscataway NJ: IEEE, 2015: 1858–1863.
- [72] Xu W, Huang J, Cheng L. A novel coordinated motion fusion-based walking-aid robot system[J]. Sensors, 2018, 18(9): 2761.
- [73] Wang Z, Peer A, Buss M. An HMM approach to realistic haptic human-robot interaction[C]//EuroHaptics Conference, 2009 and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems. Piscataway NJ: IEEE, 2009: 374–379.
- [74] Kazi Z, Chen S, Beitler M, et al. Speech and gesture mediated intelligent teleoperation[M]//Assistive Technology and Artificial Intelligence. Berlin, Heidelberg: Springer, 1998: 194–210.
- [75] Nehal S K, Obheroi R K, Anand A, et al. A navigation device with voice for visually impaired people[M]//Intelligent Communication, Control and Devices. Singapore: Springer, 2018: 1369–1380.
- [76] Walvekar V, Shetty S T, Shruthi N, et al. Blind hurdle stick: Android integrated voice based intimation via GPS with panic alert system[C]//3rd National Conference on Image Processing, Computing, Communication, Networking and Data Analytics. Piscataway NJ: IEEE, 2018: 69.
- [77] Han J S, Bien Z Z, Kim D J, et al. Human-machine interface for wheelchair control with EMG and its evaluation[C]//Proceedings of the 25th Annual International Conference of the IEEE. Piscataway NJ: IEEE, 2003, 2: 1602–1605.
- [78] Moon I, Lee M, Ryu J, et al. Intelligent robotic wheelchair with EMG-, gesture-, and voice-based interfaces [C]//2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2003. Piscataway NJ: IEEE, 2003, 4: 3453–3458.
- [79] Zhang Y Z, Yeh S S. Motion control design for robotic walking support systems using admittance motion command generator[C]//Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists. 2011, 2.
- [80] Di P, Hasegawa Y, Nakagawa S, et al. Fall detection and prevention control using walking-aid cane robot[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2016, 21(2): 625–637.
- [81] Hirata Y, Hara A, Kosuge K. Motion control of passive intelligent walker using servo brakes[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2007, 23(5): 981–990.
- [82] Xu W, Huang J, Wang Y, et al. Reinforcement learning-based shared control for walking-aid robot and its experimental verification[J]. Advanced Robotics, 2015, 29(22): 1463–1481.
- [83] Han H, Zhang X, Mu X. An approach for fuzzy control of elderly-assistant & walking-assistant robot[C]//2017 14th International Conference on Ubiquitous Robots and

- Ambient Intelligence (URAI). Piscataway NJ: IEEE, 2017: 263–267.
- [84] 徐文霞, 黄剑, 晏箐阳, 等. 兼具柔顺与安全的助行机器人运动控制研究[J]. 自动化学报, 2016, 42(12): 1859–1873.
- [85] Hirata Y, Muraki A, Kosuge K. Motion control of intelligent passive-type walker for fall-prevention function based on estimation of user state[C]//Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway NJ: IEEE, 2006: 3498–3503.
- [86] Sugaiwa T, Iwata H, Sugano S. Shock absorbing skin design for human-symbiotic robot at the worst case collision[C]//8th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, 2008. Piscataway NJ: IEEE, 2008: 481–486.
- [87] Koganezawa K, Shimizu Y, Inomata H, et al. Actuator with non linear elastic system (ANLES) for controlling joint stiffness on antaonistic driving[C]//IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 2004. Piscataway NJ: IEEE, 2004: 51–55.
- [88] Yamada Y, Hirasawa Y, Huang S, et al. Human-robot contact in the safeguarding space[J]. IEEE/ASME transactions on mechatronics, 1997, 2(4): 230–236.
- [89] Tejima N. Design method[C]//Integration of Assistive Technology in the Information Age: ICORR'2001, 7th International Conference on Rehabilitation Robotics. Clifton VA: IOS Press, 2001, 9: 346.
- [90] Ikuta K, Nokata M. General evaluation method of safety for human-care robots[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1999. Piscataway NJ: IEEE, 1999, 3: 2065–2072.
- [91] Tao C, Yan Q, Li Y. Hierarchical shared control of cane-type walking-aid robot[J]. Journal of Healthcare Engineering, 2017, doi: 10.1155/2017/8932938.
- [92] Song K T, Jiang S Y, Wu S Y. Safe guidance for a walking-assistant robot using gait estimation and obstacle avoidance[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2017, 22(5): 2070–2078.
- [93] Ko C H, Young K Y, Hsieh Y H. Optimized trajectory planning for mobile robot in the presence of moving obstacles[C]//2015 IEEE International Conference on Mechatronics (ICM). Piscataway NJ: IEEE, 2015: 70–75.
- [94] Kai Y, Arihara K. A walking support robot with velocity, torque, and contact force-based mechanical safety devices[C]//2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Piscataway NJ: IEEE, 2015: 5026–5031.
- [95] Hirata Y, Muraki A, Kosuge K. Motion control of intelligent passive-type walker for fall-prevention function based on estimation of user state[C]//Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006. Piscataway NJ: IEEE, 2006: 3498–3503.
- [96] Hirata Y, Komatsuda S, Kosuge K. Fall prevention control of passive intelligent walker based on human model [C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2008. Piscataway NJ: IEEE, 2008: 1222–1228.
- [97] Kai Y, Arihara K, Kitaguchi S. Development of a walking support robot with velocity and torque-based mechanical safety devices[C]//2014 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). Piscataway NJ: IEEE, 2014: 1498–1503.
- [98] Huang J, Di P, Wakita K, et al. Study of fall detection using intelligent cane based on sensor fusion[C]//International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science, 2008. Piscataway NJ: IEEE, 2008: 495–500.
- [99] Di P, Huang J, Nakagawa S, et al. Fall detection and prevention in the elderly based on the ZMP stability control[C]//2013 IEEE Workshop on Advanced Robotics and its Social Impacts (ARSO). Piscataway NJ: IEEE, 2013: 82–87.
- [100] Di P, Huang J, Nakagawa S, et al. Fall detection for the elderly using a cane robot based on ZMP estimation [C]//2013 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science (MHS). Piscataway NJ: IEEE, 2013: 1–6.
- [101] Di P, Huang J, Nakagawa S, et al. Fall detection for elderly by using an intelligent cane robot based on center of pressure (COP) stability theory[C]//International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science (MHS), 2014. Piscataway NJ: IEEE, 2014: 1–4.
- [102] Nakagawa S, Hasegawa Y, Fukuda T, et al. Tandem stance avoidance using adaptive and asymmetric admittance control for fall prevention[J]. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 2016, 24(5): 542–550.
- [103] Yan Q, Huang J, Xiong C, et al. Data-driven human-robot coordination based walking state monitoring with cane-type robot[J]. IEEE Access, 2018, 6: 8896–8908.

- [104] Sun P, Wang S, Karimi H R. Robust redundant input reliable tracking control for omnidirectional rehabilitative training walker[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014, doi: 10.1155/2014/636934.
- [105] Srivastava S, Kao P C, Kim S H, et al. Assist-as-needed robot-aided gait training improves walking function in individuals following stroke[J]. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 2015, 23(6): 956-963.
- [106] Kober J, Peters J. Reinforcement learning in robotics: A survey[M]//*Reinforcement Learning*. Berlin: Springer, Heidelberg, 2012: 579-610.
- [107] LeCun Y, Bengio Y, Hinton G. Deep learning[J]. *Nature*, 2015, 521(7553): 436.
- [108] Zhang J, Fiers P, Witte K A, et al. Human-in-the-loop optimization of exoskeleton assistance during walking[J]. *Science*, 2017, 356(6344): 1280-1284.
- [109] Walsh C. Human-in-the-loop development of soft wearable robots[J]. *Nature Reviews Materials*, 2018, 3(6): 78.

Intelligent walkers for disabled: Current state and future perspective

TAO Chunjing¹, YAN Qingyang², MA Lifang¹, HUANG Jian^{2*}

1. Beijing Key Laboratory of Rehabilitation Technical Aids for Old-Age Disability, National Research Center for Rehabilitation Technical Aids, Beijing 100176, China
2. School of Artificial Intelligence and Automation, Key Laboratory of Ministry of Education for Image Processing and Intelligent Control, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

Abstract China is facing the serious problem of a huge number of disabled people. The intelligent walkers can help the disabled to walk more easily and freely, improve the quality of life of the disabled, and effectively ease the conflict between the single traditional walker function and the diverse patient needs. The intelligent walkers are expected to provide a solution to solve some social problems such as the walking-aids for the disabled. This paper reviews the related researches of intelligent walkers that provide the mobility services for disabled people. This paper also reviews the senses, the interactions and the controls as well as the safety of the intelligent walkers. At the end of the paper, the development of the intelligent walker by combining new materials and artificial intelligence is discussed.

Keywords intelligent walker; walking-aids; senses; human-robot interaction ●



(责任编辑 刘志远)