

【特别策划】

智能假肢膝关节的研发要点及其研究进展综述

刘作军, 许长寿, 陈玲玲, 张燕

(河北工业大学 智能康复装置与检测技术教育部工程研究中心, 天津 300130)

摘要:目的 介绍国内外智能假肢膝关节研究的主要进展,为相关领域的研发提供可借鉴的思路。方法 基于机械结构、调控方式、驱动方式,对典型假肢膝关节进行了分类比较,并从假肢穿戴者的运动意图识别、驱动控制、人机协调控制等方面做了分析。此外,对假肢膝关节在智能化研究与安全性、个性化与通用性、人机共融技术、科学伦理、关键技术等方面需要注意的问题,提出了研发要点和技术思路。**结论** 智能假肢膝关节应注重安全性与稳定性,规避用户在使用过程中的潜在危险因素;实现假肢控制参数的自整定和灵活适配,在个性化与通用性上达到平衡;综合考虑人—机—环境因素,实现协调控制;坚持“以人为本”,在技术方法和科学伦理两个方面开展医工结合的研究;突破关键技术限制,建立完善的社会医疗康复保障服务体系。

关键词: 智能假肢膝关节; 运动意图识别; 人机协调控制

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2021)10-0054-10

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.10.009

Key Point and Progress of Intelligent Prosthesis Knee Joint Research

LIU Zuo-jun, XU Chang-shou, CHEN Ling-ling, ZHANG Yan

(Engineering Research Center of Intelligent Rehabilitation Device and Detecting Technology,
Ministry of Education, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

ABSTRACT: The progress of research in the intelligent prosthesis knee joint is introduced in this paper. The thoughts are provided for the reference of research and development in this field. The typical structures, control mode and driving mode of prosthesis knee joint are compared. Moreover, the motion intention recognition of the prosthesis wearer, driving control and the human-machine coordinative control strategy of the knee joint are analyzed. Besides, some key points and thoughts are proposed for the further research of intelligent prosthesis knee joint in the aspects of safety, tri-co robot technology, personality and universality, science ethic, etc. The safety and stability of the intelligent prosthesis are emphasized to avoid the potential risk. The self-tuning and flexible adaptation of prosthetic control parameters is suggested to achieve the balance between personalization and universality. The factors of human-machine-environment are overall considered and the coordinated control is also pointed out as key points in research. Finally, some fundamental principles of “people-oriented”, combination of medical and engineering, consideration on both technical methods and scientific ethics, foundation of social physiotherapy services system, are also summarized.

KEY WORDS: intelligent prosthesis knee joint; motion intention recognition; human-machine coordinative control

在我国最近一次的残疾人调查中,因地震、车祸、工伤、疾病等原因导致的下肢截肢者人数已经达到了158万人,提升其生活质量是建设和谐社会的重要内

容。先进的假肢膝关节能够有效地恢复下肢截肢者的基本运动功能,相关的研究具有重要的社会意义和经济价值^[1]。1979年,我国民政部就创建了假肢科学研

收稿日期: 2021-03-10

基金项目: 国家自然科学基金(61773151); 国家自然科学基金(61703135)

作者简介: 刘作军(1971—),男,山东人,博士,河北工业大学教授、博士生导师,主要研究方向为智能康复辅具、智能控制方法及应用等。

究所,并在 2006 年由 11 位院士提议,经国务院批准,进一步改组成立了国家康复辅具研究中心。2015 年国务院以国发〔2015〕7 号印发《国务院关于加快推进残疾人小康进程的意见》,明确指出保障和改善残疾人的基本民生是当前残疾人工作的头等大事。其后,国务院 2016 年 60 号文《关于加快发展康复辅助器具产业的若干意见》,进一步强调了残疾人康复辅具研究的重要性。国家财政部、科技部和教育部也对相关领域的投资、科研及人才培养给予了各种政策支持。

1 智能假肢膝关节发展现状

假肢是解决下肢截肢者行动障碍的重要辅具。传统的纯机械假肢因为不具备感知和自主调节功能,所以只能满足日常生活中相对简单的最基本的辅助运动功能,其性能难以达到截肢者对高质量生活的实际需求。智能假肢由于装配了微控制器、检测人体运动状态的传感器及调节假肢关节运动速度的驱动装置,在其微控制器内嵌程序的调控下,可以对假肢的摆动期速度进行调节,并且能够对支撑期的稳定性进行自动控制。智能假肢膝关节作为下肢假肢的核心部件,融合了先进的智能控制技术、传感器技术、计算机技术、机械设计与制造技术、新材料技术与康复工程技术,是人体—机构结合的产物,其设计研发已经引起了相关领域学者和企业的高度关注。

随着传感器、微电子等技术的发展,各型假肢不断升级优化。从 Ossur 公司的 Rheo Knee 和 Power Knee 智能仿生膝关节,到 Otto Bock 公司的 C-Leg、Genium 和 Genium X3 智能仿生腿,以及各高校科研团队研发的样机等,在假肢穿戴者运动状态识别、人机协调性、助力性能、能量效率等方面表现出了良好性能^[1-3]。

20 世纪中期,一些发达国家推出了多种现代假肢膝关节,例如德国 Otto Bock 公司的机械假肢,可根据不同截肢者的行走特点,手动调节阻尼针阀开度,找到适合不同假肢穿戴者的阻尼值。20 世纪 90

年代,多种融合了自控技术的初级智能假肢陆续面市,例如英国布莱切福特公司的 IP+、日本 Nabco 公司的 NI-CIII、德国 Otto Bock 公司的 Genium、冰岛 Ossur 公司的 Rheo Knee、英国 Endolite 公司的 Elan 等^[1-3]。

随着智能化技术的进一步发展应用,各种新型智能假肢不断出现。2006 年,德国 Otto Bock 公司推出了 C-LEG 系列产品,能够利用角度、力矩等传感器判断穿戴者的运动意图,实现自主调节控制。2009 年,冰岛 Ossur 公司推出了带有致动器的 Power Knee,其后又推出了配备有更强力致动器和新型运动传感器的 Symbiotic Leg3 假肢,能使假肢穿戴者获得更为自然顺畅的步态。2012 年,德国 Otto Bock 公司在原有 C-LEG 系列假肢产品的基础上,又新推出了功能更强的 Genium 系列动力型智能假肢,具有更强的感知性能,能够实现双下肢交替上下楼梯运动,而且不同运动模式间可任意切换。2015 年,升级的 Genium X3 又增加了跑动、跨障、游泳等功能,极大地丰富了假肢穿戴者的生活。2018 年,Ossur 公司推出了 XC 仿生磁控膝关节,对传感器进行了升级,使假肢控制的稳定性和穿戴者的活动能力均得到了提升。美国 YOBAND 公司的 3K180 智能型假肢膝关节,最大的屈膝角度可以达到 120°,并包含有高功率液压装置,提升了摆动期的灵活性和支撑期的稳固性。此外,很多国外的高校在相关领域中也有所建树,例如美国卡耐基梅隆大学的 Nitish Thatte、罗德岛大学的 Huang He 等学者所在实验室研发的假肢膝关节样机,在人机协调控制、防跌倒保护等方面均具备不同的性能特点^[4-5]。国外先进的智能假肢产品见图 1。

在我国,各种假肢产品不断出现。中国台湾德林公司 2014 年推出了四连杆膝关节的 V One 智能电子义肢(中国台湾地区习惯称假肢为义肢),2020 年又新研发了五连杆膝关节的雅德力二代仿生腿,分别通过所配备的 3D 重力传感器或三轴加速度传感器,判断假肢穿戴者的行走路况和意图,调整关节阻力。北京精博公司在传统机械式 4S 单轴承重



图 1 国外先进的智能假肢产品

Fig.1 Foreign advanced intelligent prosthetic products



图2 国内智能假肢产品
Fig.2 Domestic intelligent prosthetic products

自锁和四连杆膝关节的基础上,研制了 JB-501 和 601 等型号的步速跟随气压膝关节。国家康复辅具中心及河北工业大学智能康复装置与检测技术教育部工程研究中心等单位,合作研制的 IPK-120 假肢膝关节,能够根据穿戴者的运动意图调节关节阻尼。国内智能假肢产品见图 2。此外,清华大学的金德闻、北京大学的王启年、中南大学的谭冠政、上海理工大学的喻洪流、东北大学的徐心和、杭州电子科技大学罗志增等诸多团队都研发有不同性能特点的下肢假肢实验样机^[2,6-7]。

我国的假肢膝关节产品虽然在性价比方面具有一定的优势,但是由于前期研发基础相对薄弱,所以在高端假肢产品领域的竞争力仍落后于国外产品。2018 年,我国科技部为缩小国产假肢与国外先进假肢间的技术差距,发布了国家重点研发计划“膝踝一体化仿生智能下肢假肢关键技术与应用研究”的专项,由吉林大学工程仿生教育部重点实验室联合中科院自动化所、中国台湾德林公司等多家单位共同承担,旨在研发一种液压型膝踝一体化智能假肢,相关研究已取得阶段性成果。

2 假肢膝关节的结构与调控方式

假肢膝关节从机械结构上主要分为单轴式和多轴式。单轴式具有结构简单、重量轻、易加工组装的优点,而且由于其模型简单,所以在对其进行控制时,更容易实现下肢在摆动期时的膝关节角度与力矩调节^[8-9]。然而单轴结构在支撑期时具有稳定性不足的缺陷,需要采取承重自锁的方式,防止打软腿造成的站立不稳。德国 Otto Bock 公司的 C-LEG、日本 Nabco 的 N1-C3 系列、我国精博的 4S-2 等均属于此类结构。与人体健肢膝关节的多轴特性相比,单轴式膝关节的运动必然存在与健肢不相称的问题。此外,从站立状态转换到坐下或下蹲状态时,需要做出解锁动作,给

假肢穿戴者的生活带来一定的不便,因此,目前的智能假肢通常采取多轴结构。多轴结构也称为多连杆结构,例如日本 Nabco 的 N1-C4 系列采用四连杆结构、我国德林的雅德力二代采用五连杆结构、冰岛 Ossur 的 Total Knee 采用六连杆结构。此类关节在运动中的转动瞬心位置是随着连杆伸展而变化的,能在摆动过程中较好地模拟人体膝关节的转动模式,并且在支撑期有可靠的稳定性。因此虽然其具有结构复杂、加工装配难度大、能量效率比低等方面的不足,但是仍然是目前各类智能假肢膝关节所采取的主要结构,尤其是其中结构相对简单的四连杆结构,目前被广泛采用。

从关节调控方式上,假肢膝关节分为全被动型、半主动型和动力型。根据假肢穿戴者的步速意图和行走路况等对关节进行相应模式的控制,是假肢智能化的主要特点之一。传统的被动型假肢以支撑作用为主,摆动期只能在残肢带动下僵硬摆动,由于不具备调控能力,所以不具备实现智能化的基础条件。半主动型(也被称为主被动混合型)假肢膝关节虽然不能提供助力,但是可以通过改变关节内部气缸或者液压缸阀门的开度,来调节阻尼进而改变膝关节的摆动速度,例如英国 Endolite 的液压气压混合式 Adaptive knee、德国 Otto Bock 的液压式 C-LEG、我国精博的气压式 JB-501 等。此外,还有磁流变阻尼调节式的,这类假肢关节通过电流调节磁场强度,使假肢关节内的磁流变液的黏度随磁场强度变化而改变,进而控制关节摆动的阻尼,实现调速,例如冰岛 Ossur 的 Rheo Knee 等。动力型假肢必然是未来智能假肢的发展方向,目前美国 MIT、范德堡大学和我国的河北工业大学等多家高校或科研机构均设计了不同性能的相关样机,但实现市场化的只有 Ossur 的 Power Knee 和 Otto Bock 的 Genium X3 两种^[9-10]。以 Genium X3 为例,这种动力型假肢膝关节可以实现交替上楼梯、跑步、跨越障碍、变速行走、向后行走、游泳等多种动作,并可在复杂地形中使用。由于动力型膝关节中涉及到安全性、能量效率、可靠性等核心“卡脖子”技

术,其研发成本和制作及维护费用昂贵,所以在我国的应用并不普遍。2019年,留日归国的孙小军博士在清华大学创新挑战赛上,展示了其研发的 BionicM 动力型膝关节样机并获得两项大奖,由于其本人也是假肢穿戴者的特殊身份,其依托自身科研成果所创办的健行仿生公司也因而得到了业内的广泛关注。

从驱动方式上分类,目前的各种动力型假肢膝关节均为电机驱动,其速度和力矩的控制技术均相对成熟,因此应用相对方便,其不足之处在于电机及配套电池、伺服和减速器单元等重量大、输出力矩小、关节柔性不可调、能量效率有待提高,而且假肢关节的电机旋转模式与健肢关节的肌肉带动模式之间存在本质的差异,必然造成假肢穿戴者下肢运动过程中的不对称问题^[1]。人工肌肉是近年来发展的一类新型驱动材料,可在光、电、热、磁、压力等条件下产生可逆的收缩、转动、弯曲等形式的运动,由于其在驱动和控制方式、输出力矩、伸缩幅度、能量效率等方面的研究尚处于发展初期,所以在假肢和康复领域的应用仍在探索阶段,但其潜在的应用前景非常广阔^[11-12]。

3 假肢穿戴者的运动意图识别

假肢穿戴者运动意图的准确识别,是实现人一机协调控制的基础,也是假肢智能化的重要表现之一。假肢穿戴者运动意图的识别包括运动种类识别、行走路况识别、步速识别、步幅识别、行走相位识别等内容^[13-14]。运动种类识别涉及站立、行走、坐下、下蹲等下肢运动模式及各种模式间的转换;行走路况则通常包括平地、上下楼梯和上下坡几种;步速识别通常划分为模糊的快速、中速、慢速等几个类别,在某些文献中用步频来表示;步幅指的跨步距离的大小;行走相位通常划分为支撑期和摆动期,支撑期又可根据前脚掌和后脚跟触地情况,进一步划分为后脚跟触地开始的支撑前期、全足触地后的支撑中期,后脚跟离地至前脚掌离地前的支撑末期,而摆动期则根据抬腿和落腿,进一步划分为摆动前期和后期。

智能假肢系统需要根据穿戴者身体上各种的传感器,如肌电、脑电、加速度、角加速度、陀螺仪、足底压力等传感器,通过对多源信息的传感器融合分析,识别穿戴者的运动意图。在此方面的很多相关研究仅考虑了其中的技术问题,而忽略了涉及截肢者的工程伦理问题。文献[15]和[16]分别提出了在腰部装配激光传感器、在假肢小腿前侧装配摄像头的方法,用来识别上下楼梯、上下坡和平地等路况信息,虽然具有很高的识别准确率,但有时会给残疾人带来明显的心理负担。此外,通过健肢运动检测人体运动意图,作为假肢运动的参考虽然也是一种有效的技术方案,但是在国家康复辅具中心、天津长亭假肢装配公司等单位的残疾人问卷调查中,绝对多数的截肢者对在健肢侧安装传感器和引线表示“心理上不能接受”,仅

有不足 5%的截肢者能够接受在健肢侧足底安装每周只充电一次的鞋垫式无线传感器。几乎所有被调查者,都希望所有传感器只装配在假肢或者假肢接受腔内侧。截肢者的上述要求进一步增加了假肢实现智能化的难度,这就需要解决如何根据有限的残肢信息和假肢信息判断截肢者运动意图的问题。

在各种方案中,脑电、肌电等生物电学信号能够直接反映截肢者的运动意图,而且此类信号通常早于动作发生之前,因此生物电信号控制的假肢能够较好克服执行装置固有的响应滞后,获得理想的实时性控制效果。由于脑电、肌电信号的采集装置相对复杂,其实用性受到限制,而表面肌电信号的采集具有无创伤、安全、使用方便等优点,被广泛用于人体意图识别的研究。文献[17]采取了支持向量机和线性判别分析相结合的方法,对残肢表面肌电进行了分析,判断截肢者的运动意图;文献[18]通过选取了 90 个下肢肌电采集点作为节点,构建了下肢肌肉功能网络,证明了肌电信号具有小世界特性,并通过选取关联度较大的肌电采集位置用于下肢运动意图分析;文献[19]应用基于高斯混合回归的机器学习方法建立了下肢的神经肌肉骨骼模型,判断截肢者运动力矩的意图;文献[20]提取了表面肌电信号的小波包能量特征,采用核主成分分析方法降维特征值去除了冗余的信息,利用了相关向量机对步态特征向量进行分类,识别平地、上下楼、上下坡 5 种步态。

虽然生物学信号是获取运动意图的最可靠方式,但是受限于神经/机电系统之间信息交互上的技术瓶颈,以及成本、安全性等因素,在现阶段的可行性是难以保证的。与健康人使用的外骨骼、脑卒中患者所使用的康复辅具不同,通过表面肌电信号识别运动意图时,由于不同截肢者肌肉残留状况和萎缩程度上的差异,所以其信号参数不具备通用性^[21]。此外,在使用过程中还有因电极滑移松动、出汗、表面肌电信号微弱易受干扰等导致的信号失准问题。因此基于人体生物学信号的运动意图识别目前仍停留在实验室研究范围上,其进入市场化前,仍需要解决诸多的技术问题。

从市场化应用角度出发,基于惯性传感器、足底压力传感器等力学信号的运动意图识别更具通用性,目前所有的智能假肢产品均采用此种方式判断人体下肢运动意图。文献[22]和[23]分别采用了线性判别分析、卷积神经网络方法对系踝部位的加速度计和陀螺仪信号进行了分类识别,用于判断平地行走、上下楼梯和上下斜坡在内的 5 种运动模式及运动转换;文献[24]采用了高斯混合模型和投票法相结合的方式,分析了关节角度、角速度和力矩信号,实现了对坐、站、行走 3 种运动模式及其相互转换的识别;文献[25]提出了非接触式电容传感方法,从人体运动时肌肉形变引起电容信号变化的规律中提取了运动意图信息。

力学类传感器信号的本质特征是在动作发生后的信息,而运动意图识别则需要具有预测性质,这就形成了一个复杂的“因果倒置”问题。例如文献[24]中,虽然其运动意图的识别率达到了100%,但这是建立在足够多传感器数据的基础上得到的,所识别的结果会产生500 ms的延时,难以用于假肢关节的实时控制;文献[26]在准确性与实时性之间进行了折中,采取了利用支撑期的足底压力信号和残肢加速度与角度信号,预测摆动期路况和步速意图的方式,并应用了传感器融合与隐马尔科夫模型相结合的方法,实现了准确的预测性识别,为摆动期的膝关节控制提供了有效信息,由于假肢在支撑期可通过残肢和地面反作用力由穿戴者自主控制,所以该文献有比较理想的实用价值;文献[27]和[28]将表面肌电信号与惯性传感器信号相结合,通过了多源信息分析,兼顾了运动意图识别的可靠性和实时性,在一定程度上弥补了力学类传感器在运动意图识别方面的不足。

除了上述对下肢行走、站立、坐下等常规运动意图识别的研究外,还有一些对于骑自行车^[29]、跑动^[30]、异常跌倒^[31]等特殊动作的识别,其方案多采取生物电学信号与惯性传感器相结合的方式,所使用的数据处理方式主要包括阈值比较、支持向量机、k最近邻和基于D-S证据理论等传感器融合方法。

对假肢穿戴者运动意图的识别,仍将是今后需要着重研究的问题。从技术装备角度,需要继续研究可穿戴的低功耗、无触感、轻微型,甚至隐形的人体运动信息传感器;从理论方法角度,需要探索智能化的信息分析算法,通过对人体多源运动信息的融合处理,并有效滤除因人体行走振动、外界干扰等因素的影响,实现对运动意图的快速和准确识别;从未来长远的医工结合与学科交叉角度,在神经机器接口技术获得突破后,能够通过对人体神经信息的解码获取截肢者的运动意图,实现人对假肢关节等外部机器的直接控制,将是最具智能化的方式。

4 假肢膝关节的驱动控制

智能假肢的控制系统通常分为三个层次,最高的感知层对人体的运动意图进行识别和解码,中间的转换层把运动意图转换为相应的控制算法,最下的执行层根据相应的控制参数驱动关节电机实现闭环控制^[31-32]。感知层相当于智能假肢控制的输入环节,属于假肢穿戴者运动意图识别问题;执行层则相当于智能假肢控制的输出环节,属于具体的机电装置驱动问题;中间的转换层是假肢膝关节控制的核心问题,即如何保证假肢在不同步速、路况、步态相位的情况,实现人机间的协调控制,目前执行层所采取的主要控制方法包括有限状态机、无模型动态矩阵、迭代学习控制、摆动期阻抗控制和基于规则的方法等^[24,30,32-36]。

假肢膝关节的建模是对其进行控制系统设计和

仿真验证的基础,常用的建模方法分为两种,一类为基于假肢机构模型基础建立数学模型,另一类为基于肌肉机构力学模型。第一类方法将下肢各关节运动描述为直接的旋转驱动方式。文献[37]将下肢简化为棍棒式结构,建立了基于拉格朗日方法的人体下肢质心惯量模型,并利用零力矩点动力学稳定理论得到期望的运动轨迹。这是利用拉格朗日方程或者牛顿欧拉方程,对假肢的支撑期和摆动期分别进行的建模。文献[38]进一步考虑了下肢运动过程中足—地间交互力和膝关节单边接触力等强非线性因素对假肢步态的影响,并基于多刚体动力学中关于接触力及摩擦力的机理,提出采用Kelvin-Voigt模型和库伦模型描述足—地间接触力和摩擦力,采用Kelvin-Voigt模型描述膝关节单边接触力,建立了四连杆膝关节假肢的拉格朗日动力学模型,在此模型基础上,进一步定义了步态相关系数,并分析了膝关节液压阻尼器刚度、阻尼参数对相关系数的影响。第二类方法将下肢关节运动描述为肌肉收缩带动的运动,文献[39]将与残肢运动相关的肌肉转换为收缩元、串联弹性元和并联弹性元,分别建立了支撑期与摆动期的Hill肌肉模型,用于计算假肢膝关节控制的角度与力矩。然而在实际行走过程中,地面的反作用力、残肢髁关节的摆动力矩、关节机构摩擦力等均具有一定的随机不确定性,因此基于模型的控制方法虽然在仿真分析中均能得到理想的效果,但是在实际应用中仍面临扰动估计与实时补偿等技术难点问题。

鉴于上述问题,目前的假肢控制策略多以无模型的控制方法为主,例如专家系统、无模型动态矩阵方法、无模型自适应动态规划等方法^[40],或者采取更简单实用的方式,例如基于行为策略的有限状态机方法,即将假肢膝关节的控制简化为正向旋转、反向旋转和停止等几个简单动作,通过传感器信号实现各个行为之间的触发转换控制。此外,常规的建模方法,通常只反映关节角度、速度、力矩等随时间变化的特性,并不能反映下肢运动过程的逻辑规律和周期性特征,例如左右腿的交互运动、支撑期和摆动期的交替进行等,而极大加代数将对象变化过程的时间—逻辑关系抽象为计时事件图,建立描述对象的抬腿、落腿等各离散事件的次序与同步关系的代数方程。文献[41]运用极大加代数方法研究了多足机器人步态的优化与控制问题;文献[42]将其应用于上肢康复机器人系统的周期稳态与自主控制问题。下肢运动具有明显的时间—逻辑特征,同样适用于此方法。

下肢假肢膝关节的控制应有效利用下肢运动的特征,采取有针对性的控制策略。首先,下肢运动具有典型的重复性周期特点,其历史数据和重复的行走过程数据可以用于不断学习校正,实现控制参数的优化。文献[35]和[43]分别采用了迭代学习控制和强化学习方法对假肢膝关节进行控制,此类方法是基于数

据的无模型控制策略，能够利用历史步态周期的状态量和控制量不断学习优化，最终实现假肢关节角度的准确跟踪。其次，各运动阶段固定且循环往复是下肢运动的另一个特征。文献[30]、[32]和[44]据此采用了有限状态机的方法，将下肢运动从支撑前期到摆动期的各不同阶段视作不同的状态，根据足底压力信号或者其他运动传感器的特征值，在其满足状态转移条件的基础上，实现步态阶段的转移，并根据不同步态阶段的运动性质调节假肢膝关节的控制参数。再次，下肢假肢的控制对精度的要求不高，以小腿长 50 cm 为例，膝关节角度偏差 1° ，足部偏差仍小于 1 cm，对步幅和与健肢的对称性不会产生明显的影响。因此，在设计假肢控制器时，可以在一定范围内，将幅值控制的精度让步于安全性、稳定性和响应速度等其他控制指标，并适当采取满意控制或一定程度的容错控制策略进行控制参数的选择和性能评价^[45-46]。最后，由于受目前假肢关节驱动方式和穿戴者运动意图识别速度的限制，所以假肢膝关节响应的滞后特征一直是制约控制实时性和与健肢协调性的主要问题。对此，除了研究快速的运动意图识别方法之外，还可以尝试采取预测控制^[47]或前馈控制^[48]的方式对假肢膝关节的滞后采取超前的调节。

目前的假肢膝关节控制策略主要针对平地、上下坡和上下楼梯等常规地形的行走控制，对于假肢穿戴者出现因异常而发生跌倒危险的保护控制问题，目前也已有一些初步的研究成果。文献[39]针对一般阻抗控制方法在假肢穿戴者平衡恢复过程中响应速度慢、输出力矩不足的问题，建立了一个基于神经肌肉模型的假肢关节控制器，提升了假肢膝关节的安全性。文献[49]通过人机混合系统的运动学数据分析，在检测到跌倒的同时给出了摆动期的恢复策略。文献[50]基于健康人的跌倒保护经验制订了对应假肢膝关节的跌倒保护策略，以四连杆假肢机构为对象，通过多项式拟合建立了运动控制模型，设计了基于事件触发的下肢假肢跌倒保护控制系统。然而上述研究的测试多采用仿真或者模拟跌倒方式的实验，其在实际行走中突发绊、滑时的保护效果尚不能完全保证。此外，对平衡恢复过程中的人机协调控制方面，均缺少深入的研究。

需要强调的是，由于智能假肢的控制器不能与人的神经系统之间直接进行信息交互，所以在控制中会难免出现不协调甚至发生危险的情况，对于具备自主运动功能的动力型假肢而言，这一问题显得尤为重要。因此，在未来的假肢控制研究中，不应单纯将假肢视作一个配合人体运动的附属单元，而应从更高层次面，进行系统的控制。

5 假肢膝关节的人机协调控制

人体的下肢运动控制是一个双向过程，不仅需要

通过神经控制骨骼肌带动肢体运动，还需要通过视觉、触觉和力觉等感知器官获得反馈信息。然而假肢只是补偿了其运动能力，无法补偿人体所需的感知反馈，比如足底离地或触地的状态和地面反作用力等，也就无法感知并克服不平坦地面、异物砾绊、路面粘滑等外部扰动，进而无法实现躯体、残肢髋关节与假肢膝关节之间的协调控制。同样，智能假肢的控制器也只能通过间接的方式判断穿戴者的运动意图，判断过程的延迟和误识别问题，同样会影响假肢关节的准确控制。此外，智能假肢在正常行走时，应以配合残肢髋关节和健肢的协调运动为控制目标，而当出现因为砾、绊、滑等引起跌倒的危险情况发生时，则需要迅速从“配合”模式切换到“保护”模式，同时应使假肢穿戴者感知到危险并与假肢关节通过整体“条件反射式”的协同动作，恢复平衡或者保证最小的伤害程度。因此，为了让截肢者像控制自己的健肢一样控制假肢运动，必须建立必要的人—机交互通道和人在环内的控制系统结构^[51]，才能实现“假肢膝关节控制器”与“人脑”两个控制器之间的协调动作。

人体残肢的感知反馈分为侵入式和非侵入式两大类^[1,9]。侵入式感知需要将电极植入截肢者人体，并通过微电流产生特定感觉神经，使截肢者产生近似真实的感觉，但这种方式也存在一定的危险性和不确定性，涉及复杂的科学伦理问题，目前尚处于实验室研究阶段。非侵入式人体感知方法主要分为残肢触觉感知、功能电刺激，以及听觉等几种方式。基于触觉感知的方式是将假肢的运动信息进行编码，然后利用假肢接受腔内壁安装的触觉刺激装置对残肢皮肤产生相应的刺激序列，经过一段时间的训练使截肢者形成对不同刺激序列与假肢运动反馈之间的条件反射，并通过感知不同的刺激方式了解假肢的运动状态^[52]。功能电刺激则是通过对残肢皮肤表面施加一定强度的低频脉冲电流，刺激皮下肌肉做出相应的动作，是一种建立假肢—人反馈通道的有效手段^[7]。振动触觉刺激通过不同的刺激频率、振动幅值、持续时间、刺激位置和刺激模式等刺激参数的改变，使截肢者在经过训练后可以在不同的刺激模式与反馈信息之间建立一一对应的关系，理解其所传达的反馈信息，例如文献[53]中，在假肢接受腔内的残肢前、后和外侧各装配了一组振动器，振动器随着足底压力传感鞋垫前脚掌和后脚跟部位的压力变化，触发相应的振动器振动，使截肢者“感受”到假肢行走相位的转换信息，以调节残肢髋关节和健肢的运动状态。建立由假肢到人的信息反馈通道，不仅能实现正常行走、站立等常规动作的人机协调控制，对发生绊、滑等异常的安全保护具有更重要的作用。非侵入式人体感知反馈还有听觉辅助方式^[1,54]，可以将足部的特定状态通过不同的声音信号传递给假肢穿戴者，此类装置的使用难度相对触觉类反馈相对较低，但其在使用过程中不断发

出的声响难以得到使用者心理上的接受,而且还会影响到日常的语言交流,在满足日常使用要求方面的满意度较差,但在假肢足部突发绊、滑等不稳危险时,可以通过特定的声音信号为假肢穿戴者提供预警。

可以将智能假肢看作一种特殊的机器人,其涉及很多与其他机器人相同的共性核心技术,也面临着诸多的同样问题。随着各类机器人技术的发展并不断进入人类生产生活的各个领域,出现了机器人难以理解和接受服务对象的抽象指令、人机间沟通与协作能力差、处理意外事故的安全防护机制欠缺等“卡脖子”问题和“隐患”,制约着各类机器人技术的发展。对此,丁汉、杨学军、郑南宁院士等中国科学家在国际上最早提出了人机共融(Coexisting, Cooperative, Cognitive, Tri-Co Robots)理念^[55],得到了各国机器人学领域学者的普遍重视。人机共融是指机器人应能够与环境、人和其他机器人自然交互,能够自主适应复杂动态环境并协同作业,包括人机交互、人机交流、人机一体等主要内容,将是下一代智能机器人的标志性特征,涉及到机械、控制、感知、人工智能、计算机、人体工学、材料、能源、电气、电子,乃至医学、伦理、法律、心理、情感等诸多科学理论、工程技术、社会法律学科领域。对于智能假肢及各类康复辅具等典型的人-机混合系统,其人机共融的研究尤为重要。

我国学者在智能假肢的人机共融方面做出了诸多探索性前期研究。在智能控制领域,喻洪流等人提出了基于人机共融的主动型下肢假肢分层控制策略^[56];明东等人将脑-机接口确定为各类康复辅具实现人机交互的关键技术,并开展了大量基础性研究^[57];侯增广等人分析了基于生理电信号的感知及其控制在智能假肢中的作用^[4,10]。李志军等人也在智能假肢的人-机交互与协调控制方面开展了有代表性的研究探索^[1,13,58]。在康复医学领域,励建安教授指出了神经调控、虚拟情景、康复机器人等基础技术的重要性,并指出各类康复机器人应该具有感知、认知思维、决策、表达和交流、行动和协同、自我学习和适应、道义和仁爱等基本特征,并强调了各类康复辅具的发展必须以医工结合、多学科合作和社会科技的整体进步为依托^[59]。在工业设计领域,张瑞秋等人在介绍共融机器人典型特征及其与传统机器人本质区别的基础上,论述了人机共融在智能医疗与健康服务领域应用的前景,提出了从技术驱动转向设计驱动、从“替代”到“共融”、从“产品”到“服务体系”研发方向,为智能假肢技术的发展提供了具有重要参考借鉴价值的新思路^[60]。

“人机共融”是智能假肢等特种服务机器人的顶层设计思想,忽视这一前提指导原则,将会难以避免其今后发展中诸多困难及隐患。以工业机器人为例,由于其研发应用的初期只关注于机器人在控制精度等方面的常规性能,忽略了其“人机共融”性,导致

了后期应用的多起机器人伤人事故。从最早的1978年日本广岛切割机器人杀人事故起,至今已发生了近20次机器人伤人致死事故和更多的轻伤事故,我国2016年的深圳国际高新科技展中,就发生了机器人的误操作伤人事件。这些事故对工业机器人的发展产生了严重的负面影响,形成了深刻的教训。智能假肢等各类康复辅具和服务机器人的人机联系更加直接紧密,其潜在的安全隐患如果不能在发展初期得到重视,后续引起的损失和伤害将更为严重。因此,有必要防患于未然,在研究其机构设计、控制策略等常规问题的同时,必须在“人机共融”的大前提背景下开展相关研究。

6 假肢膝关节未来的研发要点

假肢膝关节和助行器等康复辅具均属于广义的医疗用品,其研发设计的首要因素是安全,各种智能化的控制方法必须在保证安全的前提下实施。其中安全包括但不限于支撑期不打软腿,假肢膝关节的摆动期必须在健肢进入支撑中期之后,能够可靠地避免因绊、滑引起的跌倒等。多数高校的研究团队,通常以追求控制的流畅性和协调性为主要目标,往往忽视假肢在安全性方面的指标,其研究成果虽然在安全保护设施相对完善、环境相对稳定的实验室条件下有效,但是在临床测试和实际应用中往往会遇到诸多问题。相对而言,各个假肢厂商推出的膝关节产品则更注重产品的安全性和稳定性。

个性化和通用性之间的矛盾一直存在于智能假肢的科研和应用之中。不同截肢者残肢的长度各不相同,每个人的运动习惯也存在差异,在使用同一型号假肢时,如何能够实现假肢控制参数的自整定和灵活适配,将是假肢智能化研究的一个重要课题。

智能化假肢的主要特点是能够根据穿戴者的运动意图进行人-机协调控制。在实现过程中面临着诸多理论和技术问题,应在保证假肢实用性的前提下,掌握信号分析和控制算法在准确性、实时性之间的平衡,避免过于复杂的运算,尽可能简化系统的结构、减少传感器的种类和数量。人是不同于机电装置的特殊对象,假肢的控制通常也并不需要很高的精度,其与健肢在速度、步幅、角度等存在一定的偏差是可以接受的,在研发中没有必要为追求精度而采用过于复杂的算法。同时,还应注意假肢控制器的自主性与人体控制之间的潜在冲突,从“人机共融”的宏观角度和人、机、环境综合考虑,实现假肢与穿戴者之间的协调控制。

在智能假肢设计研发中,需要特别注意其中的科学伦理问题,例如临床试验中的危险隐患是否有提前考虑,必要的保护措施、参与临床试验的截肢者是否知情等。此外,作为假肢的研发人员,必须坚持“以人为本”的原则,应设身处地地站在截肢者的角度,

充分考虑其身体、心理、经济条件等方面的实际情况,从技术方法和科学伦理两个方面开展医工结合的研究,尤其不能单纯移植外骨骼、仿人型机器人的控制方法和技术手段。

假肢产品的性能和使用效果还受到零部件加工、组装工艺水平等方面的影响。目前,我国在假肢关节所涉及的气(液)压缸、轴承、特种电机等关键零部件的材料,以及加工装配上一直难以获得突破,各基本部件的性能直接影响到假肢智能化控制的效果,成为制约假肢膝关节技术发展的瓶颈。此外,完善的临床调试及后期维护同样会影响到假肢的使用效果,需要建立完善的社会保障体系为假肢穿戴者提供服务支撑。

7 结语

目前社会上的各种智能化产品,很多只是具备初级的智能化水平,其核心技术本质仍属于自动化的范畴。随着各个康复医学、人机工程学、神经/计算机接口技术、智能化信号分析与控制技术、微机电装置等相关学科领域的发展,假肢的智能化水平也将随之提高。智能假肢与康复辅具领域的科研人员,应随时关注相关学科领域的技术发展,及时融合其中的先进技术,为残障患者提供具备更高智能化水平的康复辅具。

参考文献:

- [1] 王启宁, 郑恩昊, 陈保君, 等. 面向人机融合的智能动力下肢假肢研究现状与挑战[J]. 自动化学报, 2016, 42(12): 1780-1793.
WANG Qi-ning, ZHENG En-hao, CHEN Bao-jun, et al. Recent Progress and Challenges of Robotic Lower-limb Prostheses for Human-robot Integration[J]. Acta Automatica Sinica, 2016, 42(12): 1780-1793.
- [2] 张腾宇, 兰陟, 樊瑜波. 智能膝关节假肢的技术发展与趋势分析[J]. 中国康复医学杂志, 2017, 32(4): 451-453.
ZHANG Teng-yu, LAN Zhi, FAN Yu-bo. Technical Development and Trend Analysis of Intelligent Knee Prostheses[J]. Chinese Journal of Rehabilitation Medicine, 2017, 32(4): 451-453.
- [3] MARK A P, PHILIPP B, FRANK C S. Design Optimization in Lower Limb Prostheses: a Review[J]. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 2019, 27(8): 1574-1588.
- [4] NITISH T, TANVI S, HARTMUT G. Robust and Adaptive Lower Limb Prosthesis Stance Control via Extended Kalman Filter-Based Gait Phase Estimation[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2019, 4(4): 3129-3136.
- [5] ZHANG F, LIU M, HUANG H. Effects of Locomotion Mode Recognition Errors on Volitional Control of Powered Above-knee Prostheses[J]. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 2015, 23(1): 64-72.
- [6] 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.
HOU Zeng-guang, ZHAO Xin-gang, CHENG Long, et al. Recent Advances in Rehabilitation Robots and Intelligent Assistance Systems[J]. Acta Automatica Sinica, 2016, 42(12): 1765-1779.
- [7] 朱波, 褚亚奇, 赵新刚. 假肢中的感知及其反馈技术研究进展[J]. 生物医学工程学杂志, 2019, 36(6): 1048-1054.
ZHU Bo, CHU Ya-qi, ZHAO Xin-gang. Research Progress on Perception and Feedback Technology in Artificial Prosthesis[J]. Journal of Biomedical Engineering, 2019, 36(6): 1048-1054.
- [8] 王振平, 喻洪流, 杜妍辰, 等. 假肢智能膝关节的研究现状和发展趋势[J]. 生物医学工程学进展, 2015, 36(3): 159-163.
WANG Zhen-ping, YU Hong-liu, DU Yan-chen, et al. Research Status and Development Trend of Intelligent Prosthetic Knee[J]. Advances in Biomedical Engineering, 2015, 36(3): 159-163.
- [9] DOMINIK S P, MARTIN G, MICHAEL F R, et al. Review of The Actuators of Active Knee Prostheses and Their Target Design Outputs for Activities of Daily Living[C]. London: IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics, 2017.
- [10] 彭亮, 侯增广, 王晨, 等. 康复辅助机器人及其物理人机交互方法[J]. 自动化学报, 2018, 44(11): 2000-2010.
PENG Liang, HOU Zeng-guang, WANG Chen, et al. Physical Interaction Methods for Rehabilitation and Assistive Robots[J]. Acta Automatica Sinica, 2018, 44(11): 2000-2010.
- [11] 王玉莲, 邸江涛, 李清文. 人工肌肉纤维的研究进展[J]. 材料导报, 2021, 35(1): 1183-1195.
WANG Yu-lian, DI Jiang-tao, LI Qing-wen. Recent Progress in Artificial Muscles Fibers[J]. Materials Review, 2021, 35(1): 1183-1195.
- [12] ZHANG J, SHENG J, ONEILL C T, et al. Robotic Artificial Muscles: Current Progress and Future Perspectives[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2019, 35(3): 761-781.
- [13] 王蕾, 王辉, 黄品高, 等. 下肢截肢者行走意图识别方法研究进展[J]. 自动化学报, 2018, 44(8): 1370-1380.
WANG Lei, WANG Hui, HUANG Ping-gao, et al. Progress and Perspective of Recognition Methods for Working Intention of Lower-limb Amputees[J]. Acta Automatica Sinica, 2018, 44(8): 1370-1380.
- [14] KRAUSZ N E, LENZI T, HARGROVE L J. Depth Sensing for Improved Control of Lower Limb Prostheses[J]. IEEE Trans Biomedical Engineering, 2015, 62(11): 2576-2587.
- [15] LIU M, WANG D, HUANG H. Development of an Environment Aware Locomotion Mode Recognition System for Powered Lower Limb Prostheses[J]. IEEE Transactions on Neural System and Rehabilitation Engineering,

- 2016, 24(4): 434-443.
- [16] 喻贝贝, 孟青云, 喻洪流, 等. 基于视觉信息的智能下肢假肢路况识别[J]. 中国康复理论与实践, 2018, 24(10): 1210-1214.
YU Bei-bei, MENG Qing-yun, YU Hong-liu, et al. Road Condition Identification of Intelligent Lower Limb Prosthesis Based on Visual Information[J]. China Rehabilitation Theory and Practice, 2018, 24(10): 1210-1214.
- [17] JASON D M, MAHYO S B, MICHAEL E H. Myoelectric Walking Mode Classification for Transtibial Amputees[J]. IEEE Transaction on Biomedical Engineering, 2013, 60(10): 2745-2750.
- [18] 陈玲玲, 李珊珊, 刘作军, 等. 基于表面肌电的下肢肌肉功能网络构建及其应用研究[J]. 自动化学报, 2017, 43(3): 407-417.
CHEN Ling-ling, LI Shan-shan, LIU Zuo-jun, et al. Construction of Lower Limb's Functional Muscle Network and Its Application Based on Surface EMG[J]. Acta Automatica Sinica, 2017, 43(3): 407-417.
- [19] CIMOLATO A, MILANDRI G, MATTOS L S, et al. Hybrid Machine Learning-Neuromusculoskeletal Modeling for Control of Lower Limb Prosthetics[C]. New York: 2020 8th IEEE RAS/EMBS International Conference for Biomedical Robotics and Biomechanics (BioRob2020), 2020.
- [20] 刘磊, 杨鹏, 刘作军, 等. 采用核主成分分析和相关向量机的人体运动意图识别[J]. 机器人, 2017, 39(5): 661-669.
LIU Lei, YANG Peng, LIU Zuo-jun, et al. Human Motion Intent Recognition Based on Kernel Principal Component Analysis and Relevance Vector Machine[J]. Robot, 2017, 39(5): 661-669.
- [21] 丁其川, 能安斌, 赵新刚, 等. 基于表面肌电的运动意图识别方法研究及应用综述[J]. 自动化学报, 2016, 42(1): 13-25.
DING Qi-chuan, NENG An-bin, ZHAO Xxin-gang, et al. A Review on Researches and Applications of sEMG-based Motion Intent Recognition Methods[J]. Acta Automatica Sinica, 2016, 42(1): 13-25.
- [22] YOUNG A J, SIMON A M, HARGROVE L J. A Training Method for Locomotion Mode Prediction Using Powered Lower Limb Prostheses[J]. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 2014, 22(3): 671-677.
- [23] SU B Y, WANG J, LIU S Q, et al. A CNN-Based Method for Intent Recognition Using Inertial Measurement Units and Intelligent Lower Limb Prosthesis[J]. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 2019, 27(5): 1032-1042.
- [24] VAROL H A, SUP F, GOLDFARB M. Multiclass Real-time Intent Recognition of a Powered Lower Limb Prosthesis[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2010, 57(3): 542-551.
- [25] 王启宁, 郑恩昊, 许东方, 等. 基于非接触式电容传感的人体运动意图识别[J]. 机械工程学报, 2019, 55(11): 19-27.
WANG Qi-ning, ZHENG En-hao, XU Dong-fang, et al. Noncontact Capacitive Sensing Based Human Motion Intent Recognition[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(11): 19-27.
- [26] LIU Z, LIN W, GENG Y, et al. Intent Pattern Recognition of Lower-limb Motion Based on Mechanical Sensors[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2017, 4(4): 651-660.
- [27] BAI O, ATRI R, MARQUEZ J S, et al. Characterization of Lower Limb Activity During Gait Using Wearable, Multi-channel Surface EMG and IMU Sensors[C]. Pattaya: 2017 International Electrical Engineering Congress (iEECON), 2017.
- [28] HUANG H, ZHANG F, HARGROVE L, et al. Continuous Locomotion-Mode Identification for Prosthetic Legs Based on Neuromuscular-Mechanical Fusion[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2011, 58(10): 2867-2875.
- [29] LI X, LIU Z, GAO X, et al. Bicycling Phase Recognition for Lower Limb Amputees Using Support Vector Machine Optimized by Particle Swarm Optimization[J]. Sensors, 2020, 20(22): 6533-65548.
- [30] 刘作军, 高新智, 赵晓东, 等. 下肢假肢穿戴者跑动步态识别与膝关节控制策略研究[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(7): 74-82.
LIU Zuo-jun, GAO Xin-zhi, ZHAO Xiao-dong, et al. Running Gait Recognition and Motion Control Strategy for Lower Limb Prosthesis Wearer[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(7): 74-82.
- [31] ZHANG F, D'ANDREA S E, NUNNERY M J, et al. Towards Design of a Stumble Detection System for Artificial Legs[J]. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 2011, 19(5): 567-577.
- [32] SUP F, BOHARA A, GOLDFARB M. Design and Control of a Powered Transfemoral Prosthesis[J]. The International Journal of Robotics Research, 2008, 27(2): 263-273.
- [33] JIMENEZ-FABIAN R, VERLINDEN O. Review of Control Algorithms for Robotic Ankle Systems in Lower-limb Orthoses, Prostheses and Exoskeletons[J]. Medical Engineering & Physics, 2012(34): 397-408.
- [34] LAWSON B, VAROL H, HUFF A, et al. Control of Stair Ascent and Descent with A Powered Transfemoral Prosthesis[J]. IEEE Transaction on Neural System and Rehabilitation Engineering, 2013, 21(3): 466-473.
- [35] 龚思远, 杨鹏, 宋亮, 等. 基于 ILC 智能下肢假肢研制: 实现了对健肢步速的跟随[J]. 中国组织工程研究与临床康复, 2010, 14(14): 2295-2298.
GONG Si-yuan, YANG Peng, SONG Liang, et al. Development of Intelligent Lower Limb Prostheses Based on Iterative Learning Control: A Follow of Normal Walking Speed[J]. Journal of Clinical Rehabilitative Tissue Engineering Research, 2010, 14(14): 2295-2298.
- [36] 赵晓东, 刘作军, 苟斌, 等. 下肢假肢斜坡路况运动控制策略分析[J]. 控制与决策, 2019, 34(6): 1160-1168.
ZHAO Xiao-dong, LIU Zuo-jun, GOU Bin, et al. Analysis of Slope Motion Control Strategy of Lower Limb Prostheses[J]. Control and Decision, 2019, 34(6): 1160-1168.
- [37] QUINTERO D, MARTIN A E, GREGG R D. Toward Unified Control of a Powered Prosthetic Leg: a Simulation Study[J]. IEEE Transaction on Control System Technology, 2018, 26(1): 305-312.

- [38] 吕阳, 方虹斌, 徐鉴, 等. 四连杆膝关节假肢的动力学建模与分析[J]. 力学学报, 2020, 52(4): 1157-1173.
LYU Yang, FANG Hong-bin, XU Jian, et al. Dynamic Modeling and Analysis of the Lower Limb Prosthesis with Four-bar Linkage Prosthetic Knee[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2020, 52(4): 1157-1173.
- [39] THATTE N, GEYER H. Toward Balance Recovery with Leg Prostheses Using Neuromuscular Model Control[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2016, 63(5): 904-913.
- [40] YUE W, SI J, XIANG G, et al. A New Powered Lower Limb Prosthesis Control Framework Based on Adaptive Dynamic Programming[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2017, 28(9): 2215-2220.
- [41] LOPES G A D, KERSBERGEN B, VAN DEN BOOM T, et al. Modeling and Control of Legged Locomotion via Switching Max-plus Models[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2014, 30(3): 652-665.
- [42] 陶跃钢, 王彩璐, 王晓周, 等. 康复机器人上肢传递系统的周期稳态与自主控制[J]. 控制理论与应用, 2018, 35(1): 103-109.
TAO Yue-gang, WANG Cai-lu, WANG Xiao-zhou, et al. Period Steady-state and Autonomous Control of the Upper Limb Transfer System of Rehabilitation Robots[J]. Control Theory & Applications, 2018, 35(1): 103-109.
- [43] WEN Y, SI J, BRANDT A, et al. Online Reinforcement Learning Control for the Personalization of a Robotic Knee Prosthesis[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2020, 50(6): 2346-2356.
- [44] HUANG S, WENSMAN J, FERRIS D. Locomotor Adaptation by Transtibial Amputees Walking with an Experimental Powered Prosthesis Under Continuous Myoelectric Control[J]. IEEE Transaction on Neural System and Rehabilitation Engineering, 2016, 24(5): 573-581.
- [45] 冯惕, 李少远. 一种新的模糊约束满意优化控制算法[J]. 控制与决策, 2004(2): 187-190.
FENG Ti, LI Shao-yuan. New Satisfying Optimal Control Algorithm Based on Fuzzy Constraints Handling[J]. Control and Decision, 2004(2): 187-190.
- [46] ZHANG D, YU H, CHAO Z, et al. Soft-constraint Based Satisfactory Fault-tolerant Control for Discrete-time Systems[C]. Kumaracoil: International Conference on Control, 2015.
- [47] SHAMNA P, PRIYA N, AHAMED K S. Walking Stability Control of Biped Robot Based on Three Mass with Angular Momentum Model Using Predictive PID Control[C]. Coimbatore: 2017 International Conference of Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA), 2017.
- [48] SOPHIE H, LOUIS F, HENRI L, et al. Compliant Control of a Transfemoral Prosthesis by Combining Feed-Forward and Feedback[C]. New York: 8th IEEE RAS/EMBS International Conference for Biomedical Robotics and Biomechanics, 2020
- [49] SHIROTA C, SIMON A M, KUIKEN T A. Recovery Strategy Identification throughout Swing Phase Using Kinematic Data from the Tripped Leg[C]. Buenos Aires: The 32nd Annual International Conference of the IEEE EMBC, 2014.
- [50] 赵晓东, 刘作军, 张慧君, 等. 下肢假肢穿戴者跌倒保护控制系统设计[J]. 机器人, 2017, 39(4): 481-488.
ZHAO Xiao-dong, LIU Zuo-jun, ZHANG Hui-jun, et al. Design of Fall Protection and Control System for Wearers of Lower Limb Prosthesis[J]. Robot, 2017, 39(4): 481-488.
- [51] THATTE N, DUAN H, GEYER H. A Sample-Efficient Black-Box Optimizer to Train Policies for Human-in-the-Loop Systems with User Preferences[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2017, 2(2): 993-1000.
- [52] CHEN B J, FENG Y G, WANG Q N. Combining Vibrotactile Feedback with Volitional Myoelectric Control for Robotic Transtibial Prostheses[J]. Frontiers in Neuro-robotics, 2016, 10: 1-14.
- [53] CREA S, CIPRIANI C, DONATI M, et al. Providing Time-discrete Gait Information by Wearable Feed-back Apparatus for Lower-limb Amputees: Usability and Functional Validation[J]. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 2015, 23(2): 250-257.
- [54] YANG L, DYER P S, CARSON R J, et al. Utilization of a Lower Extremity Ambulatory Feedback System to Reduce Gait Asymmetry in Transtibial Amputation Gait[J]. Gait & Posture, 2012, 36(3): 631-634.
- [55] DING H, YANG X J, ZHENG N N, et al. Tri-Co Robot: a Chinese Robotic Research Initiative for Enhanced Robot Interaction Capabilities[J]. National Science Review, 2018, 5(6): 799-801.
- [56] 赵伟亮, 曹武警, 李璠, 等. 人机共融的主动型下肢假肢分层控制策略探讨[J]. 生物信息学, 2017, 15(3): 191-195.
ZHAO Wei-liang, CAO Wu-jing, LI Jin, et al. Hierarchical Control Strategy Research of Active Lower Limb Prosthetic Devices Based on Fusion of Man Machine Environment[J]. Chinese Journal of Bioinformatics, 2017, 15(3): 191-195.
- [57] 明东, 蒋晟龙, 王忠鹏, 等. 基于人机信息交互的助行外骨骼机器人技术进展[J]. 自动化学报, 2017, 43(7): 1089-1100.
MING Dong, JIANG Sheng-long, WANG Zhong-peng, et al. Review of Walk Assistant Exoskeleton Technology: Human-machine Interaction[J]. Acta Automatica Sinica, 2017, 43(7): 1089-1100.
- [58] LI Z J, KANG Y, XIAO Z Y, et al. Human-Robot Coordination Control of Robotic Exoskeletons by Skill Transfers[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(6): 5171-5181.
- [59] 励建安. 人机共融, 天人合一——关于康复机器人应用与发展的思考[J]. 中国康复医学杂志, 2020, 35(8): 897-899.
LI Jian-an. Tri-co Robot, Thoughts about the Application and Development of Rehabilitation Robot[J]. Chinese Journal of Rehabilitation Medicine, 2020, 35(8): 897-899.
- [60] 张瑞秋, 韩威, 洪阳慧. 人机共融产品的开发与服务体系研究综述[J]. 包装工程, 2021, 42(8): 1-11.
ZHANG Rui-qiu, HAN Wei, HONG Yang-hui. Development and Service System of Man-machine Integration Products[J]. Packing Engineering, 2021, 42(8): 1-11.