

脑性瘫痪儿童下肢康复机器人研究现状与展望*

唐心意^{1,2,3} 喻洪流^{1,2,3,5} 李 慧^{1,2,3} 杜 青⁴

脑性瘫痪(cerebral palsy, CP),简称脑瘫,是发育中的胎儿或婴幼儿脑部非进行性损伤导致的一组持续存在的中枢性运动和姿势发育障碍、活动受限症候群,是儿童致残的主要原因之一^[1]。截止到2020年1月1日,中国0—6岁儿童脑瘫总患病率为0.23%^[2]。脑瘫会导致运动和姿势发育障碍多种功能障碍^[3],主要为步行障碍,表现出异常步态,如蹲伏步态、剪刀步态等。目前还没有治疗脑瘫的特效药物。一旦确诊,临床多采用物理治疗为主的综合治疗,以解决脑瘫患儿的运动功能障碍为主,同时充分考虑患儿的生长发育^[1]。

随着科学技术的迅猛发展,用于下肢康复的机器人应运而生。下肢康复机器人主要包括减重步行训练、步态训练、下肢肌力训练等^[4]。由于机器人疗法具有大量、重复及可标准量化指标等特点,被研究人员认为可以促进神经变化如突触发生、重组和新细胞生长,促进神经重塑^[5-7]。尽管目前尚未完全明确其康复机制,但已有临床试验支持外骨骼机器人作为治疗肢体运动障碍疾病的有效手段。康复机器人成为下肢康复的热点。

许多用于成人的下肢机器人目前正在开发或已上市,在前人的整理下已经非常完整^[8-9]。但针对儿童康复的设备很少,而处于发育过程中的儿童相较于成年人具有更高的大脑可塑性,在干预后更有可能发生运动模式的改变^[10]。据研究显示,下肢康复机器人对改善痉挛型脑瘫儿童下肢关节活动度、肌力和步态时空参数效果显著,对短期运动和平衡功能有明显改善^[9]。因此针对脑瘫患儿的下肢机器人研究具有重要的临床意义。

本文对下肢康复机器人在脑瘫儿童康复中的应用进行了综述,并展望其发展方向。

1 研究现状

引入机器人康复之前,下肢矫形器在矫正患儿异常姿势、提高其日常生活能力等方面具有重要的作用。目前的双侧下肢矫形器有矫形鞋垫、踝-足矫形器、膝-踝-足矫形器、髌关节矫形器以及其他矫形器^[11]。当这些矫形器被进行改造有了

动力输入,就成了机器人。本文根据设备的移动性,将现已开发的脑瘫儿童下肢康复机器人产品或样机分成两类:固定式康复训练机器人和移动可穿戴式康复训练机器人。

1.1 固定式康复训练机器人

固定式康复训练机器人,一般为减重步行训练系统,由减重装置和电动活动平板组成,能够满足原地减重步态康复的需求,提高安全性,减少能量消耗,可用于早期康复。但设备整体体积较大,质量较重,不便移动。

最广为应用的,是瑞士Hocoma公司的Lokomat,该平台是全球使用最广泛的医院康复机器人平台。在2006年被改造成了一款儿童Lokomat,由集成在跑步机上的双侧驱动步态矫形器和体重支撑系统组成,允许骨盆的侧向位移。身体重量支持系统结合了被动弹性系统与主动动力系统,可适应支撑力的变化以实现恒定的体重支持。该系统已在51例10岁左右的脑瘫儿童身上进行了临床测试,通过对比机器人辅助步态训练前后的粗大运动功能分级评定(gross motor function classification system, GMFCS)、6min步行耐力和10m步行测试表现,发现86%的患儿使用该设备后改善了步行速度^[12-13]。

瑞士Reha-Stim Medtec公司生产了一种机器人辅助步态训练系统Gait Trainer GT-I RehaStim,由踏板、双曲柄和摇杆齿轮系统组成。2011年的一项研究结果显示使用该设备训练的患儿在步行速度、步长等方面的表现均比传统常规训练要好,并且在治疗结束后1个月内这些有益效果仍能保持^[14-15]。

波兰AGH科技大学的Giergiel等^[16]于2015年开发了一种固定下肢康复装置,包括支撑框架和外骨骼,允许患儿进行单腿独立运动、循环步态、下蹲以及不同步长训练,通过在不同速度下行走等方式确认了可行性,已在两名8岁的脑瘫双胞胎身上进行了试穿。

美国芝加哥康复研究所的Wu和Landry^[17]于2016年设计了一款绳索驱动运动训练系统3DcaLT,使用钢丝绳对腿部和骨盆施加可控制的力,可产生高达45N的辅助力或阻

DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2022.07.020

*基金项目:国家自然科学基金项目(62073224)

1 上海理工大学康复工程与技术研究所,上海市杨浦区,200093; 2 上海康复器械工程技术研究中心; 3 民政部神经功能信息与康复工程重点实验室; 4 上海交通大学医学院附属新华医院康复医学科; 5 通讯作者

第一作者简介:唐心意,女,硕士研究生; 收稿日期:2021-04-18

力。初步实验结果显示蹲伏步态显著减轻,训练结束后8周仍能保留部分步行功能的改善。

美国哥伦比亚大学的Vashista等^[18]于2017年设计了一种主动系绳骨盆辅助装置(A-TPAD),可以在跑步机上行走时对受试者的骨盆施加力和力矩。研究证明脑瘫儿童使用该设备训练后行走能力得到改善,下肢伸展增加,减轻了蹲伏步态^[19]。

我国北京大学于2017年公开了一款踝关节运动康复的机器人RARS-CP(robotic ankle-foot rehabilitation system),在此基础上于2018年改良设计了RARS-II,使用电机驱动滚珠丝杠以调节滑块位置、气动杆驱动以改变杆倾角;结合定制的虚拟现实游戏和图形用户界面进行关节自由度的测量和被动拉伸。6例不同年龄(3—13岁)的脑瘫患儿训练结果,验证了该设备对于跖屈肌群挛缩有显著的即刻改善效应^[20—21]。

罗马尼亚克雷奥瓦大学的Copilusi等^[22]于2018年针对7岁左右的儿童,开发了一种基于连杆机构和链传动机构结构的人体运动康复试验台的设计方案,包含外骨骼和跑步机。

韩国保生科技公司的儿童专用康复设备Walkbot-K,是世界首台可自动调整腿部长度的系统,采用踝关节驱动电机,在步行时提供最佳的踝关节运动轨迹。2020年的实验结果证明在日常活动中患儿的运动功能有所改善,反复运动可使痉挛性高肌张力患者缓解痉挛^[23]。

固定式康复训练机器人能更充分地训练患儿的躯干控制、单侧支撑身体重量等能力^[7]。不仅可以结合穿戴式结构,也可以结合末端引导结构如踏板和骨盆固定结构等。值得注意的是,骨盆的移动自由度被纳入了训练范围,有助于提高设备仿生性和穿戴舒适性。

1.2 移动可穿戴式康复训练机器人

移动可穿戴式康复训练机器人具有穿戴方便、体积小、质量轻的特点,可为穿戴者提供保护、支撑、助力等作用;采用自平衡技术或支撑设备,不限康复场景,具有多种训练模式帮助穿戴者进行康复训练。根据康复训练驱动关节的不同,还可以分为全关节和部分关节下肢康复机器人,前者是指将髋膝踝三个关节都纳入康复训练范围内的机器人;后者则只考虑髋、膝和踝三个关节中的某一个或两个关节的康复。

1.2.1 全关节下肢康复机器人:西班牙的Canela等^[24]于2013年在欧盟资助项目Hyper和Gait成人外骨骼的基础上改装了一种儿童外骨骼,使用伸缩杆调节长度,髋、膝和踝关节的屈伸自由度由无刷直流电机驱动。

西班牙的Marsi Bionics公司于2014年开发了一种10自由度(DOF)外骨骼ATLAS 2020,使用电机驱动髋关节内收外展和踝关节的内外翻自由度;通过可变刚度串联弹性驱动

器来驱动髋、膝和踝关节的屈伸自由度。他们目前正在进行一种与ATLAS2020类似的模块化下肢外骨骼ATLAS 2030的临床试验,重量只有14kg^[25—28]。

美国新泽西理工学院的Androwis等^[29]于2014年将被动的髋-膝-踝关节矫形器改造成一种动力外骨骼,增加伺服马达和齿轮传动,能在髋、膝和踝关节提供35N·m的扭矩。

西班牙的Bayón等^[30]于2016年推出了一款具有动态体重支持和主动驱动步态的一体化训练设备CPWalker,能对体重支撑实现精细化控制;使用液压控制髋部高度调节;还具有多模态人机交互界面,由脑电采集单元、肌电系统等组成。

1.2.2 部分关节下肢康复机器人:罗马尼亚的Copilusi等人^[31—32]于2012年开发了一种具有多个旋转轴的模块化膝关节矫形器,由3个模块化的连杆组成,并通过驱动器拉动两根柔性钢缆来带动膝关节屈曲。一个驱动器就可以通过调节来完全或部分辅助儿童行走。

意大利尼科尔库萨诺大学Patané等^[33]于2014年开发了一种WAKE-Up可穿戴式膝踝关节外骨骼,模块化设计可按需独立或者组合使用,能在膝、踝关节矢状面内提供高达5.6N·m的扭矩。实验结果显示,WAKE-Up帮助两名患者在足跟着地和脚趾离地前都有正确的足部放置。但是膝关节模块未能完全纠正患者的关节运动模式。

美国麻省理工学院的Krebs等^[34—35]于2015年开发了一种低摩擦、可高度后驱的踝关节训练机器人设备Anklebot。在测试的4名儿童中,他们的行走模式发生了变化,证明踝关节感觉运动控制可以显著帮助运动康复。

加拿大的Trexo robotics公司于2017年研发生产的Trexo Plus可穿戴式机器人设备,能给那些无法坐立的儿童提供需要的支持。该设备有舒适的支撑、可以自定义步态设置、限制安全活动范围,尺寸可调节^[36]。

美国国立卫生研究院的Lerner等^[37]于2017年研发了一款外骨骼机器人,包括一个被动可调的动态踝关节和一个制动的膝部关节,可提供高达16.1N·m的膝关节屈伸扭矩。踝关节可以配置为被动或锁定。实验结果显示绝大多数实验参与对象能够伸直双腿,“蹲伏步态”的永久性膝盖弯曲也得到减轻。

美国亚利桑那大学凤凰城分校医学院的Conner等^[38]于2020年研制了一种穿戴式踝关节机器人,为患儿提供自适应踝关节阻力进行足底屈肌阻力的步态训练。该设备验证了脑瘫患者步态中成比例的踝关节阻力会增加足底屈肌的活动。

我国的北京大艾机器人科技有限公司于2016年研发生产了一款可穿戴下肢外骨骼机器人Ailegs艾动,在一名15岁脑瘫女孩的案例中,可以发现行走速度加快,肌肉力量增强

等有益效果^[39-40]。该公司还开发了一款艾康安全平衡台,可实现减重、站立、原地步行、整机室内外平地步行等功能^[41]。

我国的成都布法罗机器人科技有限公司在2017年研发出第一代可穿戴下肢外骨骼机器人系统AIDER,于2021年公开了脑瘫儿童版本,可实现起立坐下等动作,起到康复治疗 and 助行的作用^[42]。

移动可穿戴式康复训练机器人能够实现对关节的聚焦控制,有利于患儿行走学习,提高平衡功能,改善粗大运动等。大部分在矫形器的基础上,实现模块化设计。由于是穿戴式设计,对机械结构要求较高,需要实现机器人和患儿运动自由度的高度匹配;对控制策略要求较高,要求机器人预判患儿运动意图,响应快且准,并保证安全性;对材料要求更高,既要穿戴舒适,又要强度高重量轻。

2 对比分析

为了更清晰地对比现有的各类脑瘫儿童下肢康复机器人,本文汇总整理了表1并对列出的机器人进行了特点分析。①驱动方式:皆为电机驱动,且均为盘式电机。其中3DCaLT^[17]、Copilusi^[22]、Androwis^[29]、Copilusi^[31-32]、Lerner^[37]使用电机驱动结合链传动或绳索传动,使得电机空间布置更加合理。此外,CPWalker^[30]还选用了液压驱动来调节髋部高度;RARS-CP^[20-21]选用气动杆来调节倾斜角度。②感知系统:可以监测人体位姿,有助于识别运动意图;也可以监测患儿康复训练过程中的生理状态、训练效果,为康复医师提供客观数据参考。如Lokomat^[12-13]采用冗余位置传感器和力传感器判断位置状态、RARS-CP^[20-21]采用角度传感器检测运动角度,结合肌电系统识别运动状态。CPWalker^[30]采用电位器判断状态、采用脑电、肌电传感器采集患儿生理信号等,Anklebot^[34-35]采用负载传感器监测训练过程中的负载情况等。③人机交互系统:驱动系统的位置和结构设计符合人体运动机制,在保证运动正确性的同时,最大化地模拟人体肌肉运动特性。如ATLAS^[25-28]采用人体工学穿戴设计,并模仿肌肉功能的弹性性能,可缓解一定程度的痉挛。A-TPAD^[19]模仿正常步态中的骨盆状态向骨盆施加向下的垂直力,以激活下肢肌群。

机器人在保证自身强度的前提下尽可能轻量化,在支撑人体质量、减少人体关节支撑受力的情况下不影响人体正常运动和康复训练。Lokomat^[12-13]虽然未能实现轻量化,但其身体重量支持系统结合了被动弹性系统与主动动力系统,可即时适应支撑力的变化以实现恒定的体重支持。

机器人尺寸应允许快速调节,能满足不同身高体重的患儿穿卸需求。如Walkbot-K^[23]可自动调整腿部长度;3DCaLT^[17]消除了在其他外骨骼系统所需的机械臂旋转中心和旋转轴之间的对准要求,可以减少设置所需的时间。

人机交互技术可确保人机运动契合度、运动的准确和安全并量化;也可提高穿戴舒适性。如CPWalker^[30]采集了肌电和脑电信号并结合了多模态人机交互界面;Anklebot^[34-35]包含一套3个目标导向的游戏,获得了较好的康复训练效果。基于此技术,康复医师可以通过数据对患儿的情况进行分析再调整处方,从而达到理想的康复训练效果^[43]。

3 存在的问题与展望

这些设备能够对治疗师带来帮助,减少治疗师在运动训练中的劳动强度,也能增加患儿的总训练时间,有望提高康复效果。然而对脑瘫患儿而言,目前下肢康复机器人临床应用仍然有限,可能与如下原因有关。

3.1 现有研究存在的问题

①患儿参与度无法保证。很多情况下,固定的步态轨迹控制策略可能会使机器人承担移动肢体的任务,鼓励被动训练,而不是主动训练,从而大大降低了患儿的参与度。训练的重复性也导致训练的乏味,不利于患儿的主动训练。②适用对象不明确。研究学者指出,脑瘫儿童年龄越大,其治疗康复有效率越低,不同年龄段的患儿应采取不同质量的康复疗法^[44]。现有的脑瘫儿童下肢康复机器人大多都以此为出发点,会设定不同的年龄,但没有提出明确的适用康复阶段,适龄儿童的界定标准和康复目标不清晰。③实验结果不明确。Canela等^[24]、ATLAS^[25-28]、Androwis等^[29]、Conner BC^[38]和Copilusi等^[31-32]开发的样机和产品很少或根本没有临床工作,可能没有得到进一步的研究;部分设备的初步实验虽然得到了较好的短期结果,但由于实验周期有限、样本量小、缺乏随机对照试验设计、缺乏工具评估等原因,目前仍缺乏具有代表性的随机临床试验,难以评价机器人治疗的影响,特别是长期疗效。④设备体积庞大,康复场景受限。Lokomat^[12-13]、Walkbot-K^[23]等下肢康复机器人,只能固定在医院等康复训练场所,限制了康复场景。加上设备体积过大,会对患儿和家长带来一定的心理负担。⑤成本高昂。是设备广泛应用于临床和家庭的一个重大障碍。如Lokomat的费用大约是治疗师年薪的四倍^[17];Trexo Plus,购买一台需要34900美元^[36]。费用如此高昂,以至于许多康复机构无法向更多的患者提供这种类型的康复训练。

3.2 展望

目前市面上,成人的下肢康复机器人人居多,面向脑瘫儿童的仍处于起步阶段。不难看出,国外脑瘫儿童的下肢康复开始较早,部分产品已得到一定的数据支持,并开始投入临床使用。我国儿童机器人康复产品选择较为有限,缺口很大。国内正在进行脑瘫儿童下肢康复相关研究的高校有北京大学、上海理工大学等。各大企业也正如火如荼地进行产品更新。

表1 脑瘫儿童下肢康复机器人汇总比较

分类/设备/作者	国家	驱动关节	受试对象	优点	局限性	实验评价指标
固定康复训练平台						
Gait Trainer GT-I RehaStim ^[14-15]	瑞士	无	-	由踏板模拟步态	未考虑肌肉力量、能量消耗;不同理疗师的影响无法排除	步行速度、步长
Lokomat ^[12-13]	瑞士	髋、膝-屈伸	<10岁;身高100—150cm	恒定体重支持;允许骨盆侧向位移	固定步态训练不利于下肢运动学变化	步行速度、步行耐力
Walkbot-K ^[21]	韩国	踝-屈伸	3—11岁;身高<150cm	自动调整腿部长度;最佳的踝关节运动轨迹	无法排除标准治疗或多模式干预带来运动改善的可能性	粗大运动功能测量、儿科功能独立性测量、加拿大职业表现测量、能量消耗、身体肌肉
Giergiel等 ^[16]	波兰	髋、膝、踝-屈伸	7—9岁,体重25kg ⁺	完全支撑患儿体重;防止双腿干涉	仅为针对机器人功能的测试,尚未在患儿身上实现验证	-
3DCALT ^[17]	美国	无	8—16岁	消除了机械的对准要求;高度后驱	样本量小;未与传统跑步机训练对比	步行速度、步行耐力、临床运动功能测量、步态评估
A-TPAD ^[18-19]	美国	无	9—19岁	给骨盆施力激活下肢肌群	绳索限制施力方向;测量肌肉少、样本量小	肌力、骨盆自由度、步行速度、步长、步态对称性
RARS-CP/RARS-II ^[41-42]	中国	踝-屈伸	3—13岁;身高100—150cm	无活动性外露部件;交互游戏	实验仅为单次训练前后的结果;样本量小	踝关节力矩、肌肉痉挛程度
Copilusi等 ^[20]	罗马尼亚	髋、膝、踝-屈伸	7岁 ⁺ ;体重23kg ⁺	柔性特性的运动分析方法	仅基于一例7岁儿童进行设计,不具备普适性	-
全关节下肢康复机器人						
Canela等 ^[22]	西班牙	髋、膝、踝-屈伸	7—17岁	模块化;结构可调	仅基于成人版本设计;尚无实验支撑;未描述控制策略	-
ATLAS 2020/2030 ^[23-26]	西班牙	髋-屈伸、收展;膝-屈伸;踝-屈伸、内外翻	3—12/3—14岁	人体工学设计;模仿肌肉的弹性性能;可缓解一定程度的痉挛	无实验支撑;能量消耗不明确	-
CPWalker ^[28]	西班牙	髋、膝、踝-屈伸	-	动态体重支持与主动驱动步态结合	无实验支撑,无法验证提出的控制策略有效性	-
Andrewis等 ^[27]	美国	髋、膝、踝-屈伸	痉挛型双侧瘫	被动矫正;允许上肢控制下肢	无实验支撑,控制策略未明确	-
部分关节下肢康复机器人						
Anklebot ^[32-33]	美国	踝-屈伸、内外翻	6—11岁	低摩擦、低机械阻抗、高度后驱;可达到踝关节最大运动范围	仅进行坐位实验,缺乏跑步机或地面训练对比实验	6min步行、定时行走测试
Lerner等 ^[35]	美国	膝-屈伸	5—19岁	踝关节可被动活动也可锁定	样本量小;实验排除外部辅助,不具备普遍性	肌肉活动、膝关节角度
Conner等 ^[36]	美国	踝-屈伸	痉挛型、GMFCS:I、II级	增加足底屈肌的活动;可提供自适应踝关节阻力	仅关注患侧;样本量小	肌肉活动、阻力力矩
Copilusi等 ^[29-30]	罗马尼亚	膝-屈伸	4—7岁	易穿戴、结构可调	仅针对一例4岁儿童,不具备普遍性	膝关节角度变化
WAKE-Up ^[31]	意大利	膝、踝-屈伸	5—8岁;腿长50—80cm	设备模块化;总重量仅2.5kg	膝关节驱动功率不足	髋膝踝三关节矢状角度变化
AIDER ^[40]	中国	髋、膝-屈伸	-	无需辅助支撑	仅基于成人版本设计;尚无实验支撑;未描述控制策略	-
Ailegs艾动 ^[37-39]	中国	髋、膝-屈伸	身高80—150cm;体重65kg以下	无需辅助支撑	仅基于成人版本设计	步态特征
Trexo Plus ^[34]	加拿大	髋-屈伸;膝-屈伸	-	无需辅助支撑	-	-

注:“-”表示未明确。

国内外脑瘫儿童下肢康复机器人的研究反映了未来的发展趋势:①智能化:步态控制的多样化,自适应人机交互,形成良好的个性化步态模式;引入虚拟现实等新兴技术,提高儿童的主动性,增强视听刺激;提升机械结构仿生性能,适应儿童生长发育需求;力反馈设计,有助于识别运动意图和运动模式。②阶段化:1—3岁的脑瘫儿童已经有自主运动能力,学习能力强,应给予非固定性支撑和辅助运动方法。机器人疗法应明确患儿的康复阶段,适龄儿童的界定标准和康复目标。③家庭化:设备轻便化,更实用便捷,方便日常使用;设备模块化,便于替换更新模块,适应儿童成长,延长使用寿命;成本降低,为患儿的家庭和社会减轻负担。

脑瘫儿童下肢康复机器人仍需进一步的研究,更具代表性的试验方案来证实下肢康复机器人对脑瘫儿童康复的有效性。相信在研究人员的努力下,我国能够出现更多适合脑瘫儿童的下肢康复训练设备,让更多的脑瘫儿童拥有健康美好的未来。

参考文献

- [1] 唐久来,秦炯,邹丽萍,等.中国脑性瘫痪康复指南(2015):第一部分[J].中国康复医学杂志,2015,30(7):747—754.
- [2] 封玉霞,庞伟,李鑫,等.中国0—6岁儿童脑瘫患病率的Meta分析[J].中国全科医学,2021,24(5):603—607.
- [3] 林伟泽,梁树艺,吴芙蓉.脑性瘫痪儿童青少年身体活动评估与干预[J].中国康复医学杂志,2020(5):631—635.
- [4] 张备,孙莉敏,朱俞岚,等.小儿脑瘫康复治疗技术研究与应用进展[J].中国康复医学杂志,2015,30(1):65—68.
- [5] 张纓,纪树荣,孙异临,等.胸髓横断大鼠减重平板步行训练后腰髓前角神经元超微结构的可塑性变化[J].中国康复医学杂志,2009,24(4):306—308.
- [6] 刘罡,吴毅,胡永善,等.跑台训练对脑缺血大鼠脑组织超微结构及突触素表达的影响[J].中国康复医学杂志,2008,23(10):872—874.
- [7] 华裕,朱敏,张跃.儿童康复机器人应用现状及发展趋势[J].中国康复理论与实践,2018,24(6):667—670.
- [8] Viteckova S, Kutilek P, Jirina M. Wearable lower limb robotics: A review[J]. Biocybernetics and Biomedical Engineering, 2013, 33(2):96—105.
- [9] Aaron JY, Daniel PF. State of the art and future directions for lower limb robotic exoskeletons[J]. IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng, 2017, 25(2):171—182.
- [10] Bayón C, Ramírez O, Del Castillo MD, et al. CPWalker: Robotic platform for gait rehabilitation in patients with cerebral palsy[C]. Stockholm, Sweden: 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), IEEE, 2016:3736—3741.
- [11] 周炫孜,肖农,黄蓉蓉.下肢矫形器在脑瘫患儿中的应用[J].中华物理医学与康复杂志, 2020, 42(12):1139—1141.
- [12] Riener R. Technology of the robotic gait orthosis lokomat[M]// Dietz V, Nef T, Rymer WZ. Neurorehabilitation Technology. London: Springer, 2012:221—232.
- [13] Pajaro-Blazquez M, Shetye R, Gallegos-Salazar J, et al. Robotic-assisted gait training in children with cerebral palsy in clinical practice[M]//Pons JL, Torricelli D, Pajaro M. Converging Clinical and Engineering Research on Neurorehabilitation. Berlin: Springer, 2013:29—33.
- [14] Bayon C, Raya R, Sergio LL, et al. Robotic therapies for children with cerebral palsy: a systematic review[J]. Transl Biomed, 2016, 7:1.
- [15] Smania N, Bonetti P, Gandolfi M, et al. Improved gait after repetitive locomotor training in children with cerebral palsy[J]. Am J Phys Med Rehabil, 2011, 90: 137—149.
- [16] Giergiel M, Budziński A, Piątek G, et al. Personal lower limb rehabilitation robot for children[J]. Springer, 2015, 317:169—176.
- [17] Wu M, Landry JM. Toward flexible assistance for locomotor training: design and clinical testing of a cable-driven robot for stroke, spinal cord injury, and cerebral palsy[M]// Reinkensmeyer DJ, Dietz V. Neurorehabilitation Technology. Switzerland: Springer, Cham, 2016:435—459.
- [18] Vashista V, Jin X, Agrawal S. Active tethered pelvic assist device (A-TPAD) to study force adaptation in human walking[C]. Hong Kong, China: 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2014), IEEE, 2014:718—723.
- [19] Kang J, Martelli D, Vashista V, et al. Robot-driven downward pelvic pull to improve crouch gait in children with cerebral palsy[J]. Science Robotics, 2017, 2(8): eaan2634.
- [20] Zhou Z, Wang C, Zhang Z, et al. Mechatronic design of an ankle-foot rehabilitation robot for children with cerebral palsy and preliminary clinical trial[C]. Proc. of the 18th IEEE International Conference on Industrial Technology, Toronto, Canada: IEEE, 2017:825—830.
- [21] 王荣丽,周志浩,席宇诚,等.机器人辅助脑瘫儿童踝关节康复临床初步研究[J].北京大学学报(医学版), 2018, 50(2):207—212.
- [22] Copilusi C, Dumitru N, Margine A. Children locomotion rehabilitation test bed designed from kinematic considerations[M]// Doroftei I, Oprisan C, Pislă D, et al. New advances in mechanism and machine science. Switzerland: Springer, Cham. 57: 171—179.
- [23] Jin LH, Yang SS, Choi JY, et al. The effect of robot-assisted gait training on locomotor function and functional capability for daily activities in children with cerebral palsy: a single-blinded, randomized cross-over trial[J]. Brain Sci,

- 2020,10(11):801.
- [24] Canela M, Ama AJD, Pons JL. Design of a pediatric exoskeleton for the rehabilitation of the physical disabilities caused by cerebral palsy[M]// Pons JL, Torricelli D, Pajaro M. Converging Clinical and Engineering Research on Neurorehabilitation. Berlin: Springer,2013:255—258.
- [25] Sancho-Pérez J, Pérez M, García E, et al. Mechanical description of ATLAS 2020, a 10-DOF pediatric exoskeleton [M]//Advances in Cooperative Robotics. Singapore: World Scientific,2016:814—822.
- [26] Sanz-Merodio D, Sancho J, Pérez M, et al. Control architecture of the ATLAS 2020 lower-limb active orthosis[C]. London, UK: Proceedings of the 19th International Conference on CLAWAR 2016, World Scientific,2016:860—868.
- [27] Cestari M, Sanz-Merodio D, Arevalo JC, et al. ARES, a variable stiffness actuator with embedded force sensor for the ATLAS exoskeleton[J]. Industrial Robot: An International Journal, 2014,41(6):518—526.
- [28] Marsibionics, Marsibionics [EB/OL]. [2021-04-07]. <http://www.marsibionics.com/>.
- [29] Androwis G, Michael PA, Strongwater A, et al. From hip-knee-ankle orthosis to pediatric exoskeleton[C]. Chicago, USA: The 36th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC'14), IEEE, 2014. DOI:10.13140/2.1.3084.2244.
- [30] Bayón C, Ramírez O, Del Castillo MD, et al. CPWalker: robotic platform for gait rehabilitation in patients with cerebral palsy[C]. Stockholm, Sweden: 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), IEEE, 2016(3736—3741).
- [31] Copilusi C, Margine A, Dumitru N. Case study regarding a new knee orthosis for children with locomotion disabilities [M]// Corves B, Lovasz EC, Hüsing M.Mechanisms, transmissions and applications. Switzerland: Springer International Publishing, 2015:147—155.
- [32] Copilusi C. Design of a new knee modular orthotic device from cinematic considerations[J]. Lecture Notes in Engineering and Computer Science, 2012, 3:2010—2015.
- [33] Patane' F, Rossi S, Del SF, et al. Wake-up exoskeleton to assist children with cerebral palsy: design and preliminary evaluation in level walking[J]. IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng,2017,25(7):906—916.
- [34] Krebs HI, Michmizos KP, Monterosso L, et al. Pediatric anklebot: pilot clinical trial[C]. Singapore: 2016 6th IEEE International Conference on Biomedical Robotics and Bio-mechatronics (BioRob), IEEE,2016:662—666.
- [35] Michmizos KP, Rossi S, Castelli E, et al. Robot-aided neurorehabilitation: a pediatric robot for ankle rehabilitation [J]. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 2015, 23(6):1056—1067.
- [36] Tréxò robotics, Trexo Home [EB/OL]. [2021-04-07]. <https://trexorobotics.com/>.
- [37] Lerner ZF, Damiano DL, Bulea TC. A lower-extremity exoskeleton improves knee extension in children with crouch gait from cerebral palsy[J]. Science Translational Medicine,2017,9(404): eaam9145.
- [38] Conner BC, Luque J, Lerner ZF. Adaptive ankle resistance from a wearable robotic device to improve muscle recruitment in cerebral palsy[J]. Annals of Biomedical Engineering, 2020, 48(4):1309—1321.
- [39] 帅梅.双足型下肢外骨骼康复训练机器人: CN304822498S [P]. 2018-09-18.
- [40] 北京大艾机器人科技有限公司, Ailegs 系列[EB/OL]. [2021-04-07]. <https://www.ai-robotics.cn/products/ailegs>.
- [41] 北京大艾机器人科技有限公司, Aiwalker 系列[EB/OL]. [2021-04-07]. <https://www.ai-robotics.cn/products/aiwalker>.
- [42] 布法罗机器人科技(成都)有限公司. 布法罗康复机器人产品介绍 [EB/OL]. [2021-05-16]. <http://www.buffalo-robot.com/show-25-35-1.html>.
- [43] 李龙飞,朱凌云,苟向锋. 可穿戴下肢外骨骼康复机器人研究现状与发展趋势[J]. 医疗卫生装备,2019,40(12):89—97.
- [44] 张燕.关注不同年龄段脑瘫儿童康复治疗特点[J].临床医药文献电子杂志,2019,6(54):49.