

机器人辅助步行训练对脑性瘫痪患儿影响的研究进展

魏鑫鑫, 吕智海

基金项目: 深圳市龙岗区科技创新专项资金医疗卫生技术攻关项目(LGKCYLWS2023006); 龙岗区医学重点学科建设单位专项经费资助

作者单位: 154007 黑龙江 佳木斯, 佳木斯大学康复医学院、黑龙江省儿童神经康复重点实验室、佳木斯大学附属第三医院(魏鑫鑫); 518172 广东 深圳, 深圳市龙岗区妇幼保健院(汕头大学医学院龙岗妇幼临床学院)(吕智海)

作者简介: 魏鑫鑫(1997—), 女, 佳木斯大学康复医学院 2022 级硕士研究生在读。研究方向: 小儿脑损伤发病机制及相关规范化治疗研究

通信作者: 吕智海, E-mail: 13613602038@163.com

【摘要】 脑性瘫痪(简称脑瘫)是儿童发育期最常见的致残性疾病之一, 对脑瘫患儿的身心健康有着很大的影响。神经康复领域中机器人康复技术发生了革命性的变化, 并越来越多应用在临床治疗中。机器人辅助步行训练以高强度、重复性为特征, 是近年来改善神经系统疾病的研究热点。本文简单总结了步行训练机器人的不同种类、康复机制和训练方式对脑瘫儿童身体结构和功能、活动及参与能力方面的影响, 旨在为临床治疗提供可靠的依据。

【关键词】 脑性瘫痪; 机器人辅助步行训练; 国际功能、残疾与健康分类; 步态分析; 粗大运动功能

doi:10.3969/j.issn.1674-3865.2024.02.003

【中图分类号】 R742.3 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1674-3865(2024)02-0107-07

Advances in the study of the effects of robot-assisted walking training on children with cerebral palsy WEI Xinxin, LYU Zhihai. School of Rehabilitation Medicine, Jiamusi University, Jiamusi 154007, China

【Abstract】 Cerebral palsy is one of the most common disabling diseases during childhood development, which has a great impact on the physical and mental health of children with cerebral palsy. Robotic rehabilitation technology in the field of neurological rehabilitation has been revolutionized and has been increasingly used in clinical treatment. Robot-assisted walking training, characterized by high intensity and repetitiveness, has been a research hotspot for improving neurological diseases in recent years. In this paper, we briefly summarize the effects of different types, rehabilitation mechanisms and training modalities of walking training robots on the body structure and function, activity and participation ability of children with cerebral palsy, aiming to provide a reliable basis for clinical treatment.

【Keywords】 Cerebral palsy; Robot-assisted walking training; International classification of functioning, disability and health; Gait analysis; Gross motor functions

脑性瘫痪(简称脑瘫)是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, 这种症候群是由于发育中的胎儿或婴幼儿脑部非进行性损伤所致。脑瘫的运动障碍常伴有感觉、知觉、认知、交流和行为障碍以及癫痫和继发性肌肉、骨骼等问题^[1]。2021 年报告显示中国 0~6 岁脑瘫儿童的总患病率为 0.23%, 男童的患病率为 0.22%, 女童脑瘫患病率为 0.12%, 略高于国际患病率(0.21%)^[2]。目前, 脑瘫是导致儿童肢体残疾的最主要的原因之

一^[3]。患儿由于痉挛、肌肉无力、张力异常或肌肉疼痛等引起的肌肉损伤会降低关节的活动范围, 选择性运动控制, 从而损害日常生活活动能力^[4-7]。对于脑瘫患儿来说, 他们因运动模式异常, 行走时比同龄正常儿童更加费力, 而辅助步行设备可以提高他们的耐力、稳定性并且纠正异常姿势^[8]。

机器人辅助步行训练(robotic-assisted gait training, RAGT)通过不断重复训练任务, 使患儿在正常步行周期中练习下肢的运动, 纠正异常的运动

模式^[9]。通过下肢的感官知觉向大脑发送信号,并帮助发展大脑可塑性^[10]。通过精确控制步行速度,治疗师可以逐步增加强度以达到最大的治疗效果。此外,训练参数可以自动记录,进而更好地比较不同训练强度的效果^[11]。RAGT 有助于延长训练时间,重复一致的运动模式,并提供一种娱乐性的训练方式。本文就其在脑瘫患儿康复中的类型和应用进行综述。

1 RAGT 机器人的类型

下肢康复机器人在功能上可以分为牵引式和外骨骼式两种类型。牵引式下肢康复机器人的主要特征在于通过带动患者足部运动,实现对髋关节、膝关节和踝关节的训练,末端牵引式机器人不需要考虑硬件系统中关节的对应关系,使患者使用更加方便。此外,这类康复机器人在进行训练时具有较高的安全性^[12]。外骨骼式机器人在结构上更为复杂,具备更高级的功能和能力。与牵引式机器人相比,外骨骼式机器人能够对患者的运动意图进行判断,基于正常步态进行模拟和控制多个关节,提供个性化的支持。在步行过程中外骨骼机器人能够为患者提供更加真实有效的主动训练,这种主动训练方式有助于患者恢复肢体运动功能和改善步行能力,进而提高生活质量。因此,外骨骼式机器人被视为康复领域新的研究方向和发展趋势^[13]。目前临床上常见的外骨骼式下肢康复机器人设备有以下几种类型。

1.1 Locomat

Locomat 是最常用的 RAGT 设备之一^[14],体重支持系统和双侧驱动步态矫形器集成在跑步机上。体重支持系统结合了被动弹性系统与主动动力系统,能够适应支撑力的变化,实现恒定的体重支持。髋关节和膝关节上的传感器可以测量人机交互作用力,调整运动并帮助儿童保持正常的步态轨迹。患者可以在可变速度下进行更长时间的训练,同时保持相对的恒定的步态模式^[15]。目前,它已经在临床领域广泛应用,用于治疗不同的神经疾病,如脊髓损伤、中风^[16]或神经退行性疾病如帕金森综合征和多发性硬化症^[17]。

1.2 CPWalker

CPWalker^[18]是一种专为脑瘫患儿设计的外骨骼 RAGT 装置,其可以在地面行走训练时为患儿提供稳定性和部分体重支持,并通过单独控制各个关节,使每个关节都可以在多种模式下运行,如位置控制模式、抗阻模式和零力控制模式,使运动适应患者当前的能力,增加了系统的模块化。每种模式进行的过程中机器人可以根据每个患者能力的进展制定

相应的参数,包括部分体重支持力度、步速和关节总运动范围^[19]。此外,机器人设有生物反馈策略来激励儿童走路。临床医生可以轻松控制 CPWalker 机器人直观的界面,实时监控患儿的练习^[20]。

1.3 Innowalk Pro(IP)

IP^[21]是一种新的站立设备,通过为残疾儿童提供辅助、引导重复运动,进而使患儿接近正常步态。主要由电动步态矫形器、体重支持系统、头枕、肩带和腰带侧面支撑组成。此外还有托盘、颈部支撑、肩带和手柄等附件,来支撑手臂移动,以免过度伸展。IP 可以在不同的空间中移动,并且在使用过程中调整儿童的活动范围、频率及功能,从而获得更好的治疗效果^[22]。有研究表明该机器人可以改善患儿的被动关节活动度、肌张力并且提高患儿的生活质量^[23]。

1.4 Walkbot-K

Walkbot-K 是为儿童设计的基于跑步机的外骨骼 RAGT 系统,该设备可以自动调节腿部长度以适应患儿。使用髋关节、膝关节和踝关节驱动电机,为患者提供最佳的步态运动轨迹,使患儿可以在跑步机上向前行走,并提供部分体重支持,治疗师可以以最小的体力提供强化训练。Walkbot 可以为患儿提供模拟场景训练和生物反馈训练,同时对患者肌张力、肌力、步态进行评估,达到集测量、诊断和治疗为一体的效果^[24]。

1.5 下肢型混合辅助肢体 (hybrid assistive limb, HAL) 机器人

日本筑波大学开发的主动式腰部可穿戴外骨骼机器人 HAL 可改善不同病因引起的步态障碍,其收集来自髋关节和膝部角度传感器,鞋子中的压力传感器,以及来自膝关节和髋关节伸肌和屈肌电极的生物电信号。基于所获得的信息,确定运动支撑,并驱动髋关节和膝关节装置内的动力单元以辅助佩戴者的关节运动^[25]。与其他机器人不同的是,佩戴者可主动驱动机器人进行移动。不仅在改善身体功能如主动运动和扩大关节运动范围方面非常有效,还能提高行走和站立姿势稳定性^[26]。

1.6 Atlas 外骨骼

Atlas 外骨骼^[27]是一种新型的儿科 RAGT 型装置,目前用于脊髓性肌萎缩症和脑瘫儿童。ATLAS2030 外骨骼是一款双边驱动的可穿戴外骨骼,提供 8 个自由度,每条腿 4 个(臀部、膝盖和脚踝在矢状面上旋转,髋关节在额面上旋转)。这些执行器基于专利技术 ARES^[28],提供可调节的角度,能够最大限度地减少因撞击产生的冲击力,与用户安全地交互,并在被动弹性元件中存储和释放能量。

2 RAGT 在脑瘫儿童中的治疗效果

近年来,随着 RAGT 在脑瘫儿童康复中的应用,学者们对其作用也进行了研究。根据世界卫生组织《国际功能、残疾和健康分类》(international classification of functioning, disability and health, ICF)基于 ICF 理论框架下的指导^[29],从身体功能和结构、活动和参与、背景性因素 3 个维度进行分析,关注其对步态、平衡、粗大运动功能、耐力、参与能力等方面的研究。

2.1 身体结构和功能

2.1.1 关节活动度

脑瘫是一种常见的静止性神经损伤形式,通常表现为远端肌肉无力,向心性收缩困难,运动困难。静止性神经损伤会导致继发性运动范围受限、力量、肌肉张力和选择性运动控制障碍^[30]。

Delgado 等^[31]报道,患儿接受为期 1 个月的 ATLAS2030 外骨骼机器人辅助步态训练后,冠状面的关节活动度(髋关节和膝关节伸展以及踝关节背屈)与初始状态相比,有了明显的改善。有研究同样发现了 RAGT 可以改善脑瘫儿童的关节活动度。使用 RAGT 诱导的步态模式治疗 12 名年龄 7~13 岁的痉挛型双瘫患儿,采用计算机步态分析数据与正常发育儿童的数据进行对比,显示患儿治疗 4 周后髋关节内旋活动范围减小^[32]。Mataki 等^[33]探讨研究下肢 HAL 机器人对脑瘫患儿关节活动度和步行能力的影响,发现与干预前相比,患儿足底痉挛步态改善,摆动相的膝关节和髋关节屈曲角度增加,改善了步态对称性。研究推测 RAGT 可以用于肌肉再教育,改善脑瘫患儿关节活动度和足底的痉挛步态。踝关节背屈也对改善患儿步态和提高下肢动力具有重要意义。

2.1.2 肌张力

脑瘫中肌张力的改变是最常见也是最主要的临床表现。痉挛型、共济失调型和混合型都有肌肉张力异常的症状。因此,改善肌张力是小儿脑瘫治疗的重点和难点^[34]。

赵维维^[35]研究中选取 91 例脑瘫儿童,对照组 45 例接受常规康复训练,观察组 46 例采用情景互动智能步行训练和常规康复训练联合实行的方式,治疗 3 个月后对比其疗效,RAGT 可调节和降低肌张力,放松四肢肌肉,明显改善患儿肌肉痉挛症状,促进行走能力。一项系统评价回顾了 2009~2017 年的相关文献,合并了来自 9 个不同的欧洲国家的原始数据,包含 2017 名 18 岁以下患儿^[23],其结果也表明使用动态设备 Innowalk 可以改善脑瘫儿童的

被动关节活动度和肌张力。目前关于 RAGT 对脑瘫患儿肌张力的研究还比较少,因此未来还应该开展更多高质量的研究,为进一步探究 RAGT 对脑瘫患儿的影响提供更多参考依据。

2.1.3 肌力

肌肉形态是力量产生的主要决定因素,脑瘫的神经运动症状可导致继发性肌肉骨骼问题,如关节活动范围变小、肌肉生长改变和骨骼畸形,这可能进一步造成患儿肌肉的无力,尤其是膝关节和踝关节周围的肌群发育不良导致的下肢肌力降低,高达 80% 患儿受到类似障碍的困扰^[36]。

有研究探讨 RAGT 对年龄在 7~13 岁痉挛型双瘫儿童肌力的疗效,将脑瘫患儿的干预前后数据与正常发育儿童的数据进行对比^[32]。结果显示,干预组经过训练后股二头肌、股直肌和胫骨前肌的肌力增加。Delgado 等^[31]研究的结果与之相符,患者在接受为期 1 个月的 ATLAS2030 外骨骼机器人辅助步态训练后,下肢肌群的力量增加。此外,训练结束后与初始状态相比,患儿痉挛状况有所减轻。Yazıcı 等^[37]进行的前瞻性队列研究发现,在 RAGT 治疗 3 个月后进行评估,患儿患腿站立的时间延长,肌力测试显示治疗后肌力改善得以保持。以上研究初步表明,RAGT 有长期改善肌肉力量和步态模式的潜力。然而需要更大样本量进一步研究以验证这些结果。

2.1.4 步态参数

步态参数一般包括步长、步幅、步速、步频等。在正常的步态下,人们可以移动和探索周围环境。而步态障碍患者常表现出步速低、所需支撑力大、步长和步宽较短以及步态节奏慢等表现,导致动态稳定性差^[38],从而影响儿童的功能和生活质量。

Kuroda 等^[26]探究使用 HAL 步行训练对脑瘫患儿的长期益处,每天使用 HAL 进行 20 min 步行训练,在干预前、干预后以及 1 个月、2 个月、3 个月和 1 年的随访中接受评估,发现患儿步速、步幅、步频和 6 min 步行测试均有显著改善,且其步速和 6 min 步行测试在干预后 3 个月仍然有效。因此,HAL 训练对脑瘫儿童安全可行,并能够长期维持患儿运动功能和行走能力。Mataki 等^[33]针对痉挛型脑瘫患儿,研究 HAL 对其步行能力,步态模式和步态对称性的影响。结果发现,与干预前相比,HAL 干预后患儿足底痉挛步态改善,摆动相的膝关节和髋关节屈曲角度增加,步速和步幅显著增加,步态对称性也得到了改善。本研究结果显示马蹄足异常步态的改善和髋关节摆动阶段屈曲角度的增加可使脑

瘫步速增加、步幅增大和步态对称性改善。有文献报道 RAGT 与常规治疗相比在步速、步幅、奔跑和跳跃能力方面表现出更好的治疗效果^[39]。以上研究结果表明 RAGT 可能改善脑瘫患儿的行走能力。研究团队认为肢体关节角度的对称性的改善是患者步行能力提高的原因之一。RAGT 诱导的运动也可能促进感觉输入,增强肌肉活动对中枢神经系统的反馈,在运动功能恢复中起着重要作用。

2.2 活动与参与

2.2.1 粗大运动功能

儿童的粗大运动功能直接影响活动和参与等生活质量指标^[40]。粗大运动功能量表用来评估患儿的粗大运动功能,有 5 个功能区,A 区为对卧位与翻身,B 区为坐位,C 区为爬与跪,D 区为站立,E 区为走、跑与跳。各功能区的评分标准是 4 分制,与粗大运动功能测量的相关性非常强,具有良好的信度与效度。可以用于评估治疗前后的站立、行走、奔跑和跳跃^[41]。

Ammann-Reiffer 等^[11]的一项随机对照试验探讨了 RAGT 对脑瘫儿童的治疗作用,结果发现与对照组相比治疗后 5 周儿童的粗大运动功能测量的 E 维度和 D 维度变化均没有显著差异。但另一项关于 RAGT 对脑瘫儿童治疗的研究却有不一样的结论^[42],该团队研究中通过步态分析和粗大运动功能量表评估,发现 24 名双瘫型脑瘫患儿经过为期 4 周,每周 5 次的 Locomat 治疗后,D 维度的受试者粗大运动功能有轻微的改善,E 维度仅在年龄较小且病情较严重的患者中有所改善。这表明 RAGT 对脑瘫患儿的粗大运动功能效果与患者的障碍程度相关。最近的一项研究发现,HAL 可以改善脑瘫患儿的粗大运动功能且改善效果在干预 1 年后仍然保持^[26]。RAGT 可能对儿童期运动障碍安全可行,并能够在长期内维持对运动功能和行走能力的改善效果。

2.2.2 平衡

患有脑瘫的儿童行走、跑步或站立时,在保持平衡方面有很大的障碍。由于躯干肌肉无力和背部运动控制不良,他们形成不安全和不适当的坐姿^[43]。步行期间的上肢和下肢运动提供了有关平衡控制和步态稳定性的信息,上半身(头部、手臂和躯干)在步态中起着重要作用。

在 Wallard 等^[44]的研究中,一组儿童接受 Locomat 机器人辅助步态康复训练,另一组接受传统治疗,发现 RAGT 在步态平衡控制方面具有显著效果,这可能与治疗组中质心推力和压力中心动态轨迹显著改善有关。Yazıcı 等^[37]随机对照研究表明,在 RAGT

组中患儿平衡能力得到了明显的改善,并且这些能力在治疗后 3 个月能够保持,而对照组在这些方面没有得到保持。这表明 RAGT 能够对平衡能力产生持续的积极影响。Han 等^[45]研究结果显示,RAGT 可以通过增加单腿支撑时间、改善身体质心和压力中心的动态轨迹进而改善脑瘫患儿的平衡能力,并可以在治疗后得以保持。因此,尽早进行 RAGT 对脑瘫儿童的步态和平衡的训练更加有效,并且治疗效果可以长期维持。

2.2.3 能量消耗

脑瘫是儿童神经肌肉功能障碍的最常见原因,与正常发育中儿童相比,患有脑瘫的儿童在行走时能量消耗增加,运动能力下降^[46]。脑瘫儿童在行走过程中下肢肌肉过度协同激活^[47]可能是导致能量消耗增加的原因。因此,脑瘫儿童治疗的一个重要目标是减少步行中的能量消耗。

马婷婷等^[48]对 34 例痉挛型脑瘫患儿展开研究,将其随机分为对照组和试验组,每组 17 例。对照组接受 60 min 的常规物理治疗,试验组接受 30 min 的常规物理治疗和 30 min 的机器人辅助步态训练,用生理消耗指数进行评估,研究发现两组能量消耗并没有显著差异。而 Bunge 等^[49]却发现,与无动力外骨骼训练相比,低辅助训练和高辅助训练中能量运输的代谢成本显著增高。与基线步行速度相比,在高辅助训练中的能量消耗差异有统计学意义。Bayón 等^[20]的研究亦支持这个观点。与运动后相比,所有参与者在运动过程中每分钟心跳测量的耗氧量都有所增加。上述研究表明,RAGT 可能增加脑瘫儿童的能量消耗,但在能量消耗方面仍需要更多大样本、设计良好的实验来证实。

2.2.4 耐力

RAGT 给脑瘫患儿提供了强大的动力,提高了参与者的注意力,增强了患儿步行时的耐力。耐力测量方法各不相同,包括 2 min 步行测试、6 min 步行测试和 10 min 步行测试^[50]。Kuroda 等^[26]探究使用 HAL 步行训练对脑瘫患儿的影响,共纳入了 9 名患者,在 4 周,每天 20 min,共 12 次训练后,HAL 步行训练组在首次治疗后以及干预后 1 年的随访中 6 min 步行测试评分显著改善,提示 HAL 在改善步行耐力方面可能存在长期效应。Conner 等^[51]的研究中使用了计时起立行走测试并且要求参与者尽快地行走,包括从坐到站和从站到坐的动作,这需要患者有良好的控制能力和功能。研究结果发现患儿计时起身行走和 6 min 步行测试两者均有改善。在一项样本量较大的脑瘫儿童的回顾性分析中,RAGT

改善了所有脑瘫儿童的 6 min 步行测试结果, 这表明 RAGT 能够有效提高脑瘫儿童的耐力水平^[52]。以上研究初步表明, RAGT 能够很好地改善脑瘫儿童的运动障碍和行走能力, 并能够长期维持。

2.2.5 日常生活活动能力

脑瘫是一种以肌张力、运动和姿势发育障碍为特征的神经发育性疾病, 严重限制了患儿的活动和社会参与。无论是否有合并症, 脑瘫都可能造成身体结构和功能的损害, 导致教育、休闲和游戏方面的活动和参与受限, 从而对患儿及其家庭健康有关的生活质量产生负面影响^[53]。

Jin 等^[54]评估中使用了儿童功能独立性评定量表(functional independence measures for children, WeeFIM)和加拿大职业行为量表(Canadian occupational performance measure, COPM)测量患儿的活动能力和满意度。观察到患儿 WeeFIM 的移动能力得分显著提高, COPM 的表现和满意度测量得分也显著增加。这表明通过 RAGT, 脑瘫儿童的日常活动能力和功能独立性得到了改善。然而, Pool 等^[55]将 40 名脑瘫患儿随机分为 RAGT 组和传统治疗组, 进行了持续 6 周的训练, 分别在第 0 周, 第 6 周和第 26 周时进行评估。评估结果显示, 两组间结果没有统计学差异。说明 RAGT 并不能改善脑瘫患儿的日常生活能力。Cortés-Pérez 等^[39]回顾了 15 个随机对照试验, 比较 RAGT 与常规治疗的效果, 并评估了与脑瘫儿童的步态和运动功能相关的多个结果。研究表明, 与常规治疗相比, RAGT 组在提高日常生活活动能力方面并不优于传统治疗组。RAGT 可能并不能改善脑瘫患儿的日常生活活动能力, 具体结果还需要进行进一步研究。

3 总结与展望

RAGT 在改善脑瘫患儿关节活动度、肌力、肌张力、步态参数、平衡和耐力方面取得了较好的临床疗效。然而在日常生活活动能力方面可能没有效果。在粗大运动功能、能量消耗、参与这些方面仍需进一步研究证实 RAGT 的有效性。可能的原因是目前相关研究样本量比较少, 研究对象选择的标准, 步行训练强度及相关评估方法没有统一, 很难进行比较分析。本文纳入大多数发表的文献都将 Locomat 作为步态辅助训练设备, 因此该装置可能是训练脑瘫患儿步态模式最有效的设备。与 RAGT 相比, 传统康复训练是在治疗师辅助下进行的, 依靠于治疗师的劳动强度和治疗技术水平, 很难满足于患者对不同治疗时间、训练强度和训练频率的要求。而 RAGT 拥有标准化的训练环境、可提供单独可持续

性的体重支持及高强度的训练方式, 适应患者的功能水平, 做出有针对性的治疗。但目前机器人更多引进于国外, 尺寸设计不符合国人的身形且价格昂贵、设备笨重, 患儿穿戴时需要大量辅助, 无法在临床上广泛使用。未来工程师可通过多学科合作, 进一步完善该设备, 使其更好地应用于临床。

脑瘫儿童的步行功能障碍是脑瘫患者康复过程中重要的一环, 平衡、耐力、粗大运动功能参与贯穿了儿童生长、发育的各个阶段, 患者每个阶段的不同障碍都需要康复团队对其做出有针对性的指导, 这样才能最大程度地帮助脑瘫患儿。对 RAGT 的研究应该从训练强度、时间、训练时机以及训练适应的人群来全方位地考虑, 有计划地使用各种各样的康复手段协同作用。未来还需进行大样本, 多中心的随机对照试验来比较不同 RAGT 的训练效果, 在试验的设计和实施过程中寻找出统一的评价和实施标准, 采用严格的质量控制方法以进一步研究 RAGT 对脑瘫儿童的影响, 以便对训练进一步改善。

参考文献

- [1] 张建奎, 李晓捷, 唐久来, 等. 中国脑性瘫痪康复指南(2022)核心内容解读[J]. 中华实用儿科临床杂志, 2022, 37(24): 1841-1853.
- [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] Byrne R, Noritz G, Maitre NL, et al. Implementation of early diagnosis and intervention guidelines for cerebral palsy in a high-risk infant follow-up clinic[J]. *Pediatr Neurol*, 2017, 76:66-71.
- [4] Russo RN, Skuza PP, Sandelance M, et al. Upper limb impairments, process skills, and outcome in children with unilateral cerebral palsy[J]. *Dev Med Child Neurol*, 2019, 61(9):1080-1086.
- [5] Straathof EJM, Hamer EG, Hensens KJ, et al. Development of muscle tone impairments in high-risk infants: Associations with cerebral palsy and cystic periventricular leukomalacia[J]. *Eur J Paediatr Neurol*, 2022, 37:12-18.
- [6] MacWilliams BA, Prasad S, Shuckra AL, et al. Causal factors affecting gross motor function in children diagnosed with cerebral palsy[J]. *PLoS One*, 2022, 17(7):e0270121.
- [7] Ouyang RG, Yang CN, Qu YL, et al. Effectiveness of hand-arm bimanual intensive training on upper extremity function in children with cerebral palsy: A systematic review[J]. *Eur J Paediatr Neurol*, 2020, 25:17-28.
- [8] Rodríguez-Costa I, De la Cruz-López I, Fernández-Zárate I, et al. Benefits of a low-cost walking device in children with cerebral palsy: a qualitative study[J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2021, 18(6):2808.
- [9] Ivanova E, Krause A, Schalicke M, et al. Let's do this together: Bi-Manu-Interact, a novel device for studying human

- haptic interactive behavior[J]. IEEE Int Conf Rehabil Robot, 2017,2017:708-713.
- [10] Aras B, Ya sar E, Kesikburun S, et al. Comparison of the effectiveness of partial body weight-supported treadmill exercises, robotic-assisted treadmill exercises, and anti-gravity treadmill exercises in spastic cerebral palsy[J]. Turk J Phys Med Rehabil, 2019,65(4):361-370.
- [11] Ammann-Reiffer C, Bastiaenen CHG, Meyer-Heim AD, et al. Lessons learned from conducting a pragmatic, randomized, crossover trial on robot-assisted gait training in children with cerebral palsy (PeLoGAIT)[J]. J Pediatr Rehabil Med, 2020,13(2):137-148.
- [12] 孙朝亮. 多姿态端部牵引式下肢康复机器人系统设计与研究[D]. 秦皇岛:燕山大学,2022.
- [13] 王靓. 偏瘫患者下肢康复机器人的研究进展[J]. 中国医疗器械信息, 2020,26(6):32,90.
- [14] Brütsch K, Schuler T, Koenig A, et al. Influence of virtual reality soccer game on walking performance in robotic assisted gait training for children[J]. J Neuroeng Rehabil, 2010,7:15.
- [15] Jamwal PK, Hussain S, Ghayesh MH. Robotic orthoses for gait rehabilitation: An overview of mechanical design and control strategies[J]. Proc Inst Mech Eng H, 2020,234(5):444-457.
- [16] Son S, Lim KB, Kim J, et al. Comparing the effects of exoskeletal-type robot-assisted gait training on patients with ataxic or hemiplegic stroke[J]. Brain Sci, 2022,12(9):1261.
- [17] Llamas-Ramos R, Sánchez-González JL, Llamas-Ramos I. Robotic systems for the physiotherapy treatment of children with cerebral palsy: a systematic review[J]. Int J Environ Res Public Health, 2022,19(9):5116.
- [18] Bayón C, Ramírez O, Serrano JI, et al. Development and evaluation of a novel robotic platform for gait rehabilitation in patients with Cerebral Palsy: CPWalker[J]. Rob Auton Syst, 2017, 91:101-114.
- [19] Bayón C, Lerma S, Ramírez O, et al. Locomotor training through a novel robotic platform for gait rehabilitation in pediatric population: short report [J]. J Neuroeng Rehabil, 2016,13(1):98.
- [20] Bayón C, Martín-Lorenzo T, Moral-Saiz B, et al. A robot-based gait training therapy for pediatric population with cerebral palsy: goal setting, proposal and preliminary clinical implementation[J]. J Neuroeng Rehabil, 2018,15(1):69.
- [21] Innwalk Pro[EB/OL]. [2023-05-27]. <https://www.madeformovement.com/innwalk-pro>.
- [22] Grodon C, Bassett P, Shannon H. The 'heROIC' trial: Does the use of a robotic rehabilitation trainer change quality of life, range of movement and function in children with cerebral palsy[J]? Child Care Health Dev, 2023,49(5):914-924.
- [23] Schmidt-Lucke C, Käferle J, Rydh Berner BM, et al. Effect of assisted walking-movement in patients with genetic and acquired neuromuscular disorders with the motorised Innwalk device: an international case study meta-analysis[J]. Peer J, 2019,7:e7098.
- [24] Lee DR, Shin YK, Park JH, et al. Concurrent validity and test-retest reliability of the walkbot-k system for robotic gait training[J]. J Mechan Med Biol, 2016, 16(8):1640029.
- [25] Sankai Y, Sakurai T. Exoskeletal cyborg-type robot[J]. Sci Robot, 2018,3(17):eaat3912.
- [26] Kuroda MM, Iwasaki N, Mutsuzaki H, et al. Benefits of a wearable cyborg HAL (hybrid assistive limb) in patients with childhood-onset motor disabilities: a 1-year follow-up study [J]. Pediatr Rep, 2023,15(1):215-226.
- [27] Grau A, Morel Y, Puig-Pey A, et al. Advances in robotics research: from lab to market; ECHORD++: Robotic Science Supporting Innovation: Vol. 132[M]. Cham: Springer International Publishing, 2020.
- [28] Manuel C, Daniel SM, Elena G. A new and versatile adjustable rigidity actuator with add-on locking mechanism (ARES-XL)[J]. Actuators, 2018, 7(1):1.
- [29] Leonardi M, Lee H, Kostanjsek N, et al. 20 years of ICF-international classification of functioning, disability and health: uses and applications around the world[J]. Int J Environ Res Public Health, 2022,19(18):11321.
- [30] Patel DR, Neelakantan M, Pandher K, et al. Cerebral palsy in children: a clinical overview[J]. Transl Pediatr, 2020,9 (Suppl 1):S125-135.
- [31] Delgado E, Cumplido C, Ramos J, et al. ATLAS2030 pediatric gait exoskeleton: changes on range of motion, strength and spasticity in children with cerebral palsy. a case series study[J]. Front Pediatr, 2021,9:753226.
- [32] Žarković D, Šorfova M, Tufano JJ, et al. Gait changes following robot-assisted gait training in children with cerebral palsy[J]. Physiol Res, 2021,70(S3):S397-408.
- [33] Mataka Y, Mutsuzaki H, Kamada H, et al. Effect of the hybrid assistive limb on the gait pattern for cerebral palsy[J]. Medicina(Kaunas), 2020,56(12):673.
- [34] Yuanjie Y, Jianyi X, Jinyan X, et al. Acupuncture in the treatment of abnormal muscle tone in children with cerebral palsy: a meta-analysis[J]. Behav Neurol, 2023,2023:4662788.
- [35] 赵维维. 情景互动智能步行训练对痉挛型脑瘫患儿足背屈功能及步态指标的影响[J]. 中国疗养医学, 2021,30(2):155-156.
- [36] Hanssen B, Peeters N, De Beukelaer N, et al. Progressive resistance training for children with cerebral palsy: A randomized controlled trial evaluating the effects on muscle strength and morphology[J]. Front Physiol, 2022,13:911162.
- [37] Yazıcı M, Livanelioğlu A, Gücüyener K, et al. Effects of robotic rehabilitation on walking and balance in pediatric patients with hemiparetic cerebral palsy [J]. Gait Posture, 2019,70:397-402.
- [38] Dimakopoulos R, Syrogiannopoulos G, Grivea I, et al. Kinematic and temporospatial changes in children with cerebral palsy during the initial stages of gait development[J]. Dev Neurorehabil, 2022,25(1):10-18.
- [39] Cortés-Pérez I, González-González N, Peinado-Rubia AB, et al. Efficacy of robot-assisted gait therapy compared to conventional therapy or treadmill training in children with cere-

- bral palsy: a systematic review with meta-analysis[J]. Sensors(Basel), 2022,22(24):9910.
- [40] Lee BH. Relationship between gross motor function and the function, activity and participation components of the International Classification of Functioning in children with spastic cerebral palsy[J]. J Phys Ther Sci, 2017,29(10):1732-1736.
- [41] Russell DJ, Rosenbaum PL, Cadman DT, et al. The gross motor function measure: a means to evaluate the effects of physical therapy[J]. Dev Med Child Neurol, 1989,31(3):341-352.
- [42] Petrarca M, Frascarelli F, Carniel S, et al. Robotic-assisted locomotor treadmill therapy does not change gait pattern in children with cerebral palsy[J]. Int J Rehabil Res, 2021,44(1):69-76.
- [43] Inamdar K, Molinini RM, Panibatla ST, et al. Physical therapy interventions to improve sitting ability in children with or at-risk for cerebral palsy: a systematic review and meta-analysis[J]. Dev Med Child Neurol,2021,63(4):396-406.
- [44] Willard L, Dietrich G, Kerlirzin Y, et al. Effect of robotic-assisted gait rehabilitation on dynamic equilibrium control in the gait of children with cerebral palsy[J]. Gait Posture, 2017,60:55.
- [45] Han YG, Yun CK. Effectiveness of treadmill training on gait function in children with cerebral palsy: meta-analysis[J]. J Exerc Rehabil, 2020,16(1):10-19.
- [46] Bolster EAM, Balemans ACJ, Brehm MA, et al. Energy cost during walking in association with age and body height in children and young adults with cerebral palsy[J]. Gait Posture, 2017,54:119-126.
- [47] Ettema S, Oudenhoven LM, Roelvelde K, et al. The effect of prolonged walking on muscle fatigue and neuromuscular control in children with cerebral palsy[J]. Gait Posture, 2022,93:7-13.
- [48] 马婷婷,张皓. 机器人辅助步态训练对痉挛型脑性瘫痪患儿运动和步行功能的效果[J]. 中国康复理论与实践, 2021,27(11):1260-1265.
- [49] Bunge LR, Davidson AJ, Helmore BR, et al. Effectiveness of powered exoskeleton use on gait in individuals with cerebral palsy: A systematic review[J]. PLoS One,2021,16(5):e0252193.
- [50] Booth ATC, Buizer AI, Meyns P, et al. The efficacy of functional gait training in children and young adults with cerebral palsy: a systematic review and meta-analysis[J]. Dev Med Child Neurol, 2018,60(9):866-883.
- [51] Conner BC, Remec NM, Orum EK, et al. Wearable adaptive resistance training improves ankle strength, walking efficiency and mobility in cerebral palsy: a pilot clinical trial[J]. IEEE Open J Eng Med Biol, 2020,1:282-289.
- [52] Beretta E, Storm FA, Strazzer S, et al. Effect of robot-assisted gait training in a large population of children with motor impairment due to cerebral palsy or acquired brain injury[J]. Arch Phys Med Rehabil, 2020,101(1):106-112.
- [53] Bearden DR, Monokwane B, Khurana E, et al. Pediatric cerebral palsy in botswana: etiology, outcomes, and comorbidities[J]. Pediatr Neurol, 2016,59:23-29.
- [54] 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.
- [55] Pool D, Valentine J, Taylor NF, et al. Locomotor and robotic assistive gait training for children with cerebral palsy[J]. Dev Med Child Neurol,2021,63(3):328-335.

(收稿日期:2024-01-04)

读者·作者·编者

参考文献标引格式的要求

本刊文献著录根据 GB/T 7714—2015《信息与文献 参考文献著录规则》采用顺序编码制著录。依照其在文中出现的先后顺序用阿拉伯数字加方括号标出。正文中指明原始文献作者姓名时,角码应标注在作者姓名之右上角;正文中未指明作者或非原始文献作者时,角码应标注在句末末字的右上角;正文直接叙述其文献序号时不在右上角标注(如:操作按文献[1]所示)。参考文献表按引用先后顺序用阿拉伯数字加角码标出排列于文末,并在题名或书名后,分别加用[J]或[M]。参考文献表中的作者姓名:1~3名全部列出,3名以上只列前3名,后面加“等”或其他与之相应的文字,如 et al。外文期刊名称用缩写,以《Index Medicus》中的格式为准;中文期刊用全名。每条参考文献均需著录起止页。参考文献与其全文必须核对无误。

本刊编辑部