

KidGo 外骨骼康复机器人训练对痉挛型脑性瘫痪患儿下肢运动功能的影响

张雪滢^{1,2} 何娜¹ 黄艳¹

¹山东大学附属儿童医院(济南市儿童医院), 济南 250022; ²山东体育学院, 济南 250102

通信作者: 黄艳, Email: jnhuangyan@163.com

【摘要】 目的 观察 KidGo 外骨骼康复机器人训练对痉挛型脑性瘫痪患儿下肢运动功能的影响。方法 选取 2022 年 9 月至 2023 年 6 月在山东大学附属儿童医院康复科住院的痉挛型脑性瘫痪患儿 30 例, 按照随机数字表法将其分为对照组和机器人组, 每组 15 例。两组患儿均进行常规康复, 机器人组在此基础上给予 KidGo 外骨骼康复机器人训练, 每日训练 30 min, 每周 5 d, 连续 12 周。干预前及干预 12 周后(干预后), 采用表面肌电分析系统、手持肌力测试仪、粗大运动功能评定量表(GMFM)、Berg 平衡量表(BBS)、儿童功能独立性评定量表(WeeFIM)对两组患儿的下肢肌张力和肌力、粗大运动功能、平衡能力、功能独立性进行评定。结果 与组内干预前比较, 两组患儿的下肢肌张力和肌力、粗大运动功能、平衡能力、功能独立性均有所改善($P < 0.05$)。与对照组干预后比较, 机器人组患儿的腓肠肌肌力[(11.02±4.66) μ V]和腓肠肌肌张力[(10.96±4.06) μ V]改善优异($P < 0.05$), 屈髋肌群[(35.84±9.96) N]、伸髋肌群[(33.47±10.2) N]、屈膝肌群[(34.93±14.44) N]、伸膝肌群[(41.61±9.38) N]、踝跖屈肌群肌力[(40.91±9.93) N]改善较为优异($P < 0.05$), GMFM-D [(19.07±5.56) 分]、GMFM-E [(25.87±6.61) 分]、BBS [(25.27±10.3) 分]、WeeFIM 评分[(41.47±11.65) 分]均较高($P < 0.05$)。结论 在常规康复的基础上辅以 KidGo 外骨骼康复机器人训练, 能够有效改善痉挛型脑性瘫痪患儿的下肢肌张力和肌力、粗大运动功能、平衡能力、功能独立性。

【关键词】 康复机器人; 脑性瘫痪; 肌张力; 肌力; 运动功能

DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2024.02.006

Effects of an exoskeleton rehabilitation robot on the lower limb motor function of children with spastic cerebral palsy

Zhang Xueying^{1,2}, He Na¹, Huang Yan¹

¹Rehabilitation Department, Children's Hospital Affiliated to Shandong University, Jinan 250022, China; ²Shandong Sport University, Jinan 250022, China

Corresponding author: Huang Yan, Email: jnhuangyan@163.com

【Abstract】 Objective To observe any effect of using the KidGo exoskeleton rehabilitation robot on the lower limb motor function of children with spastic cerebral palsy. **Methods** Thirty children with spastic cerebral palsy were sorted at random into a control group and a robotics group, each of 15. Both groups received conventional rehabilitation 5 days a week for 12 weeks, but the robotics group also spent 30 minutes daily training with the KidGo exoskeleton robot. Before and after the intervention, the lower limb muscle tone and strength, gross motor function, balance, and functional independence of both groups were assessed using surface electromyography, a handheld muscle strength tester, the gross motor function measure, the Berg Balance Scale, and the Wee-functional independence measure. **Results** After the intervention great improvements in average lower limb muscle tone and strength, gross motor function, balance, and functional independence were observed in both groups, but the improvements in the robotics group were significantly greater, on average. **Conclusion** Supplementing conventional rehabilitation with training using the KidGo exoskeleton rehabilitation robot can better improve muscle tone, strength, gross motor functioning, balance, and the functional independence of children with spastic cerebral palsy.

【Key words】 Rehabilitation robots; Cerebral palsy; Muscle tone; Muscle strength; Motor function

DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2024.02.006

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,是导致儿童残

疾的重要原因之一^[1-2]。脑瘫患儿由于肌张力增高和原始反射持续存在,常呈现出蹲伏、剪刀步等异常步

态,而步态障碍是影响生活质量和独立性的关键因素,因此提升患儿下肢运动功能对改善其日常生活能力来说尤为重要^[3]。

近年来,康复机器人辅助步态训练已成为研究热点,其基于神经可塑性和运动再学习原理,能够通过任务导向性训练改善患者的功能障碍,纠正异常步态,提高步行能力^[4-7]。KidGo 外骨骼康复机器人以一套骨骼式的机器假腿支撑并带动脑瘫患儿步行,并通过可爱的动物外型、讲故事、听音乐等趣味模式充分调动患儿主动康复的积极性,在步态训练中能够合理减轻下肢负担,帮助患儿维持正确的训练步态,同时还能减轻康复治疗师的工作负担,缩短治疗周期,实现精确化、自动化、智能化的康复训练目标^[8-9]。本研究采用 KidGo 外骨骼康复机器人训练对痉挛型脑瘫患儿开展干预,探讨其对患儿下肢运动功能的影响,取得了满意的疗效,报道如下。

对象与方法

一、研究对象

纳入标准:①符合《中国脑性瘫痪康复指南(2022)》中痉挛型脑瘫的诊断标准^[1];②患儿身高 100~150 cm,体重 < 80 kg;③粗大运动功能分级(gross motor function classification system, GMFCS) II 级及以上;④能够理解指令,并配合完成训练;⑤患儿监护人签署知情同意书。排除标准:①伴有严重的癫痫及骨骼系统疾病;②6 个月内接受过外科手术或任何类型的肉毒毒素制剂治疗;③合并严重的心血管、呼吸、肝脏、肾脏、胃肠道、泌尿、内分泌或血液系统疾病。

选取 2022 年 9 月至 2023 年 6 月在山东大学附属儿童医院康复科住院的痉挛型脑性瘫痪患儿 30 例,按照随机数字表法将其分为对照组和机器人组,每组 15 例。两组患儿性别、平均年龄、身高、体重、GMFCS、脑瘫分型等一般资料比较,差异无统计学意义($P > 0.05$),具有可比性,详见表 1。本研究已通过山东大学附属儿童医院伦理审核批准(编号 SDFE-IRB/P-2022021)。

二、治疗方法

两组患儿均进行常规康复训练,包括运动疗法(以 Bobath 为基础的关节活动和肌力训练,每次

40 min)、作业疗法(穿衣、转移、如厕等提升患儿日常生活活动能力的训练,每次 40 min)、物理因子治疗(肌电生物反馈,每次 20 min)、推拿治疗(每次 20 min)。每周 5 d,共 12 周。

机器人组在对照组基础上增加外骨骼康复机器人训练。选用中国杭州产 KidGo 儿童外骨骼移动式康复机器人对患儿进行下肢运动功能训练,具体方法为:①测量患儿腿长,根据结果调节设备大腿和小腿长度后锁紧卡扣;②嘱患儿扶好扶手,由下至上穿戴并依次固定绑带;③设置训练模式,由被动训练开始,初始步长设定为 15 cm;待患儿轻松无痛且自然做出正确步态时,可升档至助力模式,助力等级分别为自身体重的 30%、60% 和 90%,可根据不同阶段的功能进步而逐级增加;在主动模式中,患儿可以按照自己的意愿进行主动运动;④训练过程中,治疗师多鼓励患儿配合机器人完成步行,并尽可能多的支撑体重、控制躯干直立及伸展髌膝关节;⑤训练后采用放松模式进行牵拉。每次训练 30 min,每日 1 次,每周 5 d,连续训练 12 周。

三、评定方法

干预前及干预 12 周后(干预后),由同一位康复治疗师对两组患儿的下肢肌张力和肌力、粗大运动功能、平衡能力、功能独立性进行评定,并记录相关数据。具体如下:①采用加拿大产 BioNeuro 生物反馈仪和 Flexcomp Infiniti System 表面肌电分析系统,对两组患儿被动牵伸状态下腓绳肌、腓肠肌和内收肌的表面肌电均方根值(root mean square, RMS)进行测量。测量时将肌电传感器配合电极贴贴于患儿皮肤表面,电极贴与被测肌肉纤维走向垂直,康复治疗师对被测肌肉进行被动拉伸,并进行 3 次有效数值测量,取平均值^[10];②采用美国产 MicroFET3 手持肌力测试仪对两组患儿的髌屈肌、髌伸肌、髌外展肌、膝屈肌、膝伸肌、踝跖屈肌的肌力进行测量,康复治疗师示范动作后,语言指导患儿主动用力对抗阻力至不能抵抗为止,进行 3 次有效数值测量,取平均值^[11];③采用粗大运动功能评定量表(gross motor function measure, GMFM)的 D 区(站立区,共 39 分)与 E 区(走跑跳区,共 72 分)对两组患儿的粗大运动功能进行评定,得分越高,提示其粗大运动功能越好^[12];④采用 Berg 平衡量表(Berg balance scale, BBS)对两组患儿的平衡功能进行评定,

表 1 两组患儿一般资料

组别	例数	性别(例)		年龄 (岁, $\bar{x} \pm s$)	身高 (cm, $\bar{x} \pm s$)	体重 (kg, $\bar{x} \pm s$)	GMFCS(例)			脑瘫分型(例)		
		男	女				II 级	III 级	IV 级	偏瘫	双瘫	四肢瘫
对照组	15	9	6	6.07±1.75	119.93±10.47	23.40±6.01	4	8	3	7	4	4
机器人组	15	7	8	5.32±1.57	117.07±9.74	23.87±4.76	5	7	3	8	4	3

共计 14 项,总分 56 分,低于 40 分提示有跌倒风险^[13];⑤采用儿童功能独立性评定量表(Wee-functional independence measure, WeeFIM)评定两组患儿的综合运动能力及社会认知水平,其中运动功能包括自理、括约肌控制、转移、行走能力,认知功能包括交流和社会认知能力,共 18 项,每项评分根据独立或依赖程度分为 1~7 分,总分 126 分^[14]。

四、统计学方法

采用 SPSS 26.0 版统计学软件进行数据分析,计量资料以均数±标准差($\bar{x}\pm s$)形式表示,组内比较采用配对样本 *t* 检验,组间比较采用独立样本 *t* 检验, $P<0.05$ 表示差异具有统计学意义。

结 果

一、两组患儿干预前后的下肢肌张力比较

干预前,两组患儿腓绳肌、内收肌、腓肠肌肌张力比较,差异无统计学意义($P>0.05$)。与组内干预前比较,两组患儿的腓绳肌、内收肌、腓肠肌肌张力均有所改善($P<0.05$)。与对照组干预后比较,机器人组患儿的腓绳肌、腓肠肌肌张力改善较为优异($P<0.05$),内收肌肌张力虽较对照组小,但差异无统计学意义($P>0.05$)。详见表 2。

二、两组患儿干预前后的下肢肌力比较

干预前,两组患儿的屈髋肌群、伸髋肌群、髋外展肌群、屈膝肌群、伸膝肌群、踝跖屈肌群肌力比较,差异无统计学意义($P>0.05$)。与组内干预前比较,两组患儿的屈髋肌群、伸髋肌群、髋外展肌群、屈膝肌群、伸膝肌群、踝跖屈肌群肌力均有所改善($P<0.05$)。与对照

组干预后比较,机器人组患儿的屈髋肌群、伸髋肌群、屈膝肌群、伸膝肌群、踝跖屈肌群肌力改善较为优异($P<0.05$),髋外展肌群肌力虽较对照组大,但差异无统计学意义($P>0.05$)。详见表 3。

三、两组患儿干预前后的粗大运动功能、平衡能力及功能独立性比较

干预前,两组患儿的 GMFM-D、GMFM-E、BBS、WeeFIM 评分比较,差异无统计学意义($P>0.05$)。与组内干预前比较,两组患儿的 GMFM-D、GMFM-E、BBS、WeeFIM 评分均有所改善($P<0.05$),且机器人组患儿干预后上述指标均较对照组改善优异($P<0.05$)。详见表 4。

表 2 两组患儿干预前后的下肢肌张力比较(μV , $\bar{x}\pm s$)

组别	例数	腓绳肌肌张力	内收肌肌张力	腓肠肌肌张力
对照组				
干预前	15	17.35±4.48	15.53±3.00	17.77±5.16
干预后	15	14.94±5.25 ^a	12.76±3.22 ^a	15.02±5.15 ^a
机器人组				
干预前	15	16.92±5.70	14.86±2.36	17.79±3.10
干预后	15	11.02±4.66 ^{ab}	11.35±2.94 ^a	10.96±4.06 ^{ab}

注:与组内干预前比较,^a $P<0.05$;与对照组干预后同指标比较,^b $P<0.05$

讨 论

本研究在常规康复训练基础上,对痉挛型脑瘫患儿采用外骨骼康复机器人训练,结果显示其能够有效改善患儿的下肢肌张力和肌力、粗大运动功能、平衡能力、功能独立性。

表 3 两组患儿干预前后的下肢肌力比较(N , $\bar{x}\pm s$)

组别	例数	屈髋肌群肌力	伸髋肌群肌力	髋外展肌群肌力	屈膝肌群肌力	伸膝肌群肌力	踝跖屈肌群肌力
对照组							
干预前	15	17.09±3.96	16.47±3.66	17.88±4.14	19.91±8.27	25.01±7.33	29.85±9.36
干预后	15	27.73±10.60 ^a	26.73±7.39 ^a	24.90±8.42 ^a	25.13±9.25 ^a	33.61±9.50 ^a	32.29±9.55 ^a
机器人组							
干预前	15	15.97±4.18	17.99±2.72	17.43±3.81	16.14±4.37	23.35±5.89	27.72±8.31
干预后	15	35.84±9.96 ^{ab}	33.47±10.2 ^{ab}	28.29±7.87 ^a	34.93±14.44 ^{ab}	41.61±9.38 ^{ab}	40.91±9.93 ^{ab}

注:与组内干预前比较,^a $P<0.05$;与对照组干预后同指标比较,^b $P<0.05$

表 4 两组患儿干预前后的粗大运动功能、平衡能力及功能独立性比较(分, $\bar{x}\pm s$)

组别	例数	GMFM-D	GMFM-E	BBS	WeeFIM
对照组					
干预前	15	13.80±3.99	20.00±4.71	14.27±6.89	27.80±8.81
干预后	15	15.33±3.44 ^a	21.33±4.89 ^a	17.68±6.67 ^a	33.67±8.64 ^a
机器人组					
干预前	15	14.07±5.47	21.07±7.08	15.27±7.60	31.27±11.89
干预后	15	19.07±5.56 ^{ab}	25.87±6.61 ^{ab}	25.27±10.36 ^{ab}	41.47±11.65 ^{ab}

注:与组内干预前比较,^a $P<0.05$;与对照组干预后同指标比较,^b $P<0.05$

痉挛型脑瘫患儿因脑部信息传导中断,导致皮质运动区、锥体系所支配的肌肉痉挛,肌张力增加和肌腱反射亢进,进而出现运动障碍、姿势异常等相关症状^[15]。Tornberg 等^[16]认为外骨骼康复机器人能够降低臀部周围肌肉的痉挛状态。有研究证实痉挛型脑瘫患儿经踝关节外骨骼康复机器人干预后,其腓肠肌肌张力有所下降^[17]。本研究中,机器人组患儿的腓绳肌、腓肠肌肌张力改善较为优异,其机制可能是 KidGo 外骨骼康复机器人在步行训练中能随着步态的矫正,辅助拉伸痉挛肌肉,有效改善肌紧张状态,促使步态趋于正常^[18]。本研究中,患儿双腿多进行的是矢状面的摆动,髋部缺少相应的外展训练,这可能是机器人组患儿内收肌肌张力较对照组无明显差异的原因。

痉挛型脑瘫患儿在本体感觉和运动觉方面存在一定程度的障碍,导致其无法在步行中激活足够的肌肉运动单位,肌力较弱^[19-20]。康复机器人可针对此情况,通过髋、膝、踝行走时的反复屈伸来刺激关节和肌腱本体感受器,重建大脑皮质神经系统运动网络和脊髓步行中枢模式发生器,进而提高下肢肌力^[21]。Lerner 等^[22-24]多次研究表明,外骨骼康复机器人辅助行走可促进脑瘫患儿膝屈肌和膝伸肌活动;Cherni 等^[25]研究发现,外骨骼康复机器人能够增强髋、膝关节伸屈肌的肌力。本研究结果与其一致,但机器人组患儿髋外展肌群的肌力与对照组比较无明显差异,提示可能仍需运动疗法等进行强化针对性训练。

步态异常和平衡功能障碍在痉挛型脑瘫患儿中较为常见,其粗大运动功能和功能独立性会受到影响^[26]。与常规运动康复中针对肌张力、肌力和运动功能的专项训练不同,外骨骼康复机器人训练能通过模拟正常的步行周期,为患儿提供高强度的、重复性和交互式较好的步行训练方式^[27-28],重建大脑神经网络,强化外周深浅感觉刺激,输入正常生理步态轨迹,从而达到改善步行能力的目的^[29]。Kurod 等^[30]研究证实,外骨骼康复机器人能够提升脑瘫患儿的 GMFM 得分,改善下肢运动功能。Wallard 等^[31]发现接受机器人训练后的脑瘫患儿能更好地保持步态稳定。本研究两组患儿干预后的 GMFM-D、GMFM-E、BBS、WeeFIM 得分均有所改善,且机器人组患儿的改善幅度优于对照组,提示外骨骼康复机器人能较大程度地帮助患儿控制躯干、支撑体重,协助其步行训练,对于提升下肢运动能力有积极作用。

本研究中,两组患儿均进行了常规康复训练,其中运动疗法、作业疗法、物理因子治疗及推拿治疗能够有效促进神经细胞的重组再生及功能重建,疗效肯定,这也是脑瘫患儿康复的必要手段^[32-33];在此基础上增加的外骨骼康复机器人训练,仅作为常规治疗的辅助手

段,而非替代,该方法基于人机交互理论,循序渐进,能够提升患儿的主动康复意愿,在一定程度上可以保证训练效果的最大化^[34]。故本研究并未设置仅采用机器人训练的组别。

综上所述,本研究在常规康复的基础上辅以 KidGo 外骨骼康复机器人训练,有效改善了痉挛型脑瘫患儿的下肢运动功能,值得在临床中应用、推广。但需要注意的是,KidGo 康复机器人由于存在腿长及身高限制,不适用于低年龄段患儿,且训练模式相对单一,难以满足不同病情患儿的需求,此外,该治疗设备体积庞大,不便于穿脱,在今后的研发中,还需进一步优化改进。本研究的不足之处在于样本量较小,观察周期偏短,后续会对运动疗法与机器人训练的疗效作进一步对比,进行大样本、长周期、多角度的临床观察,以明确最佳康复介入时间、频率及强度,并开展抑制异常肌张力、降低能量消耗和优化步态等方面的研究。

参 考 文 献

- [1] 中国康复医学会儿童康复专业委员会,中国残疾人康复协会小儿脑性瘫痪康复专业委员会,中国医师协会康复医师分会儿童康复专业委员会,等.中国脑性瘫痪康复指南(2022)[J].中华实用儿科临床杂志,2022,37(20):6. DOI:10.3760/cma.j.cn101070-20220505-00500.
- [2] Ophelders D, Gussenhoven R, Klein L, et al. Preterm brain injury, antenatal triggers, and therapeutics: timing is key[J]. Cells, 2020,9(8):1871. DOI:10.3390/cells9081871.
- [3] Moreau NG, Bodkin AW, Bjornson K, et al. Effectiveness of rehabilitation interventions to improve gait speed in children with cerebral palsy: systematic review and meta-analysis[J]. Phys Ther, 2016, 96(12):1938-1954. DOI:10.2522/ptj.20150401.
- [4] Ammann-Reiffer C, Bastiaenen CH, Meyer-Heim AD, et al. Effectiveness of robot-assisted gait training in children with cerebral palsy: a bicenter, pragmatic, randomized, cross-over trial (PeLoGAIT)[J]. BMC Pediatr, 2017, 17(1):64. DOI:10.1186/s12887-017-0815-y.
- [5] Gassert R, Dietz V. Rehabilitation robots for the treatment of sensorimotor deficits: a neurophysiological perspective[J]. J Neuroeng Rehabil, 2018, 15(1):46. DOI:10.1186/s12984-018-0383-x.
- [6] De Luca R, Bonanno M, Settimo C, et al. Improvement of gait after robotic-assisted training in children with cerebral palsy: are we heading in the right direction[J]. Med Sci (Basel), 2022, 10(4). DOI:10.3390/medsci10040059.
- [7] Bonanno M, Miliuti A, La Fauci BF, et al. Rehabilitation of gait and balance in cerebral palsy: a scoping review on the use of robotics with biomechanical implications[J]. J Clin Med, 2023, 12(9):3278. DOI:10.3390/jcm12093278.
- [8] Wang WC, Yeh CY, Huang JJ, et al. Synergic effect of robot-assisted rehabilitation and antispasticity therapy: a narrative review[J]. Life (Basel), 2023, 13(2):252. DOI:10.3390/life13020252.
- [9] Hsu T, Tsai C, Chi J, et al. Effect of wearable exoskeleton on post-stroke gait: a systematic review and meta-analysis[J]. Ann Phys Rehabil Med, 2023, 66(1):101674. DOI:10.1016/j.rehab.2022.101674.

- [10] Pavão SL, Silva FP, Dusing SC, et al. Clinical tools designed to assess motor abilities in children with cerebral palsy[J]. *Dev Neurorehabil*, 2017, 20(3):149-159. DOI:10.3109/17518423.2016.1150359.
- [11] Mentiplay BF, Perraton LG, Bower KJ, et al. Assessment of lower limb muscle strength and power using hand-held and fixed dynamometry: a reliability and validity study[J]. *PLoS One*, 2015, 10(10):e140822. DOI:10.1371/journal.pone.0140822.
- [12] Salavati M, Krijnen WP, Rameckers EA, et al. Reliability of the modified gross motor function measure-88 (GMFM-88) for children with both spastic cerebral palsy and cerebral visual impairment: a preliminary study[J]. *Res Dev Disabil*, 2015, 45-46:32-48. DOI:10.1016/j.ridd.2015.07.013.
- [13] Chen Z, Huang Z, Li X, et al. Effects of traditional Chinese medicine combined with modern rehabilitation therapies on motor function in children with cerebral palsy: a systematic review and meta-analysis[J]. *Front Neurosci*, 2023, 17:1097477. DOI:10.3389/fnins.2023.1097477.
- [14] Jha KK, Karunanithi GB, Sahana A, et al. Randomised trial of virtual reality gaming and physiotherapy on balance, gross motor performance and daily functions among children with bilateral spastic cerebral palsy[J]. *Somatosens Mot Res*, 2021, 38(2):117-126. DOI:10.1080/08990220.2021.1876016.
- [15] Peeters N, Hanssen B, Bar-On L, et al. Associations between muscle morphology and spasticity in children with spastic cerebral palsy[J]. *Eur J Paediatr Neurol*, 2023, 44:1-8. DOI:10.1016/j.ejpn.2023.01.007.
- [16] Tornberg AB, Lauruschkus K. Non-ambulatory children with cerebral palsy: effects of four months of static and dynamic standing exercise on passive range of motion and spasticity in the hip[J]. *Peer J*, 2020, 8:e8561. DOI:10.7717/peerj.8561.
- [17] Sukal-Moulton TD, Clancy TP, Zhang LP, et al. Clinical application of a robotic ankle training program for cerebral palsy compared to the research laboratory application: does it translate to practice[J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2014, 95(8):1433-1440. DOI:10.1016/j.apmr.2014.04.010.
- [18] 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. DOI:10.3389/fped.2021.753226.
- [19] Steele KM, Rozumalski A, Schwartz MH. Muscle synergies and complexity of neuromuscular control during gait in cerebral palsy[J]. *Dev Med Child Neurol*, 2015, 57(12):1176-1182. DOI:10.1111/dmcn.12826.
- [20] Cappellini G, Ivanenko YP, Martino G, et al. Immature spinal locomotor output in children with cerebral palsy[J]. *Front Physiol*, 2016, 7:478. DOI:10.3389/fphys.2016.00478.
- [21] Aprile I, Iacovelli C, Goffredo M, et al. Efficacy of end-effector robot-assisted gait training in subacute stroke patients: clinical and gait outcomes from a pilot bi-centre study[J]. *NeuroRehabilitation*, 2019, 45(2):201-212. DOI:10.3233/NRE-192778.
- [22] Lerner ZF, Damiano DL, Bulea TC. A robotic exoskeleton to treat crouch gait from cerebral palsy: Initial kinematic and neuromuscular evaluation[J]. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc*, 2016, 2016:2214-2217. DOI:10.1109/EMBC.2016.7591169.
- [23] Lerner ZF, Damiano DL, Bulea TC. A lower-extremity exoskeleton improves knee extension in children with crouch gait from cerebral palsy[J]. *Sci Transl Med*, 2017, 9(404):9145. DOI:10.1126/scitranslmed.aam9145.
- [24] Lerner ZF, Damiano DL, Bulea TC. Relationship between assistive torque and knee biomechanics during exoskeleton walking in individuals with crouch gait[J]. *IEEE Int Conf Rehabil Robot*, 2017, 2017:491-497. DOI:10.1109/ICORR.2017.8009296.
- [25] Cherni Y, Girardin-Vignola G, Ballaz L, et al. Reliability of maximum isometric hip and knee torque measurements in children with cerebral palsy using a paediatric exoskeleton - Lokomat[J]. *Neurophysiol Clin*, 2019, 49(4):335-342. DOI:10.1016/j.neucli.2018.12.001.
- [26] Monica S, Nayak A, Joshua AM, et al. Relationship between trunk position sense and trunk control in children with spastic cerebral palsy: a cross-sectional study[J]. *Rehabil Res Pract*, 2021, 2021:9758640. DOI:10.1155/2021/9758640.
- [27] Molteni F, Gasperini G, Cannaviello G, et al. Exoskeleton and end-effector robots for upper and lower limbs rehabilitation: narrative review[J]. *PM R*, 2018, 10(9 Suppl 2):S174-S188. DOI:10.1016/j.pmrj.2018.06.005.
- [28] Bonanno M, Militi A, La Fauci BF, et al. Rehabilitation of gait and balance in cerebral palsy: a scoping review on the use of robotics with biomechanical implications[J]. *J Clin Med*, 2023, 12(9):3278. DOI:10.3390/jcm12093278.
- [29] de Miguel-Fernández J, Lobo-Prat J, Prinsen E, et al. Control strategies used in lower limb exoskeletons for gait rehabilitation after brain injury: a systematic review and analysis of clinical effectiveness[J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2023, 20(1):23. DOI:10.1186/s12984-023-01144-5.
- [30] 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. DOI:10.3390/pediatric15010017.
- [31] Wallard 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*, 2018, 60:55-60. DOI:10.1016/j.gaitpost.2017.11.007.
- [32] Bekteshi S, Monbaliu E, McIntyre S, et al. Towards functional improvement of motor disorders associated with cerebral palsy[J]. *Lancet Neurol*, 2023, 22(3):229-243. DOI:10.1016/S1474-4422(23)00004-2.
- [33] Liguori S, Young VM, Arienti C, et al. Overview of Cochrane systematic reviews for rehabilitation interventions in individuals with cerebral palsy: a mapping synthesis[J]. *Dev Med Child Neurol*, 2023, 65(10):1280-1291. DOI:10.1111/dmcn.15572.
- [34] Song D, Liu S, Gao Y, et al. Human factor engineering research for rehabilitation robots: a systematic review[J]. *Comput Intell Neurosci*, 2023, 2023:2052231. DOI:10.1155/2023/2052231.

(修回日期:2023-12-29)

(本文编辑:凌琛)