

基于下肢康复机器人的双任务训练对脑卒中患者下肢运动及步行能力的影响

解二康 从洋洋 王瑜元 华艳 王卫宁 白玉龙

复旦大学附属华山医院康复医学科, 上海 200040

通信作者: 白玉龙, Email: dr_baiyl@fudan.edu.cn

【摘要】目的 探讨下肢康复机器人辅助下的双任务训练对脑卒中患者下肢运动及步行能力的影响。**方法** 将 70 例脑卒中患者按照随机数字表法分为对照组和试验组, 每组 35 例。研究期间有 9 例患者脱落(因个人原因出院、转院), 最终对照组 30 例、试验组 31 例患者完成了研究。两组患者均给予常规运动训练和物理因子治疗, 对照组在此基础上增加认知-运动双任务训练, 试验组增加下肢康复机器人辅助下的认知-运动双任务训练, 每周 5 次, 持续 3 周。干预前和干预 3 周后(干预后), 采用 Fugl-Meyer 下肢运动功能评分(FMA-LE)、功能性步行量表(FAC)、数字广度测验(DST)、Berg 平衡量表(BBS)、改良 Barthel 指数(MBI)对两组患者的下肢运动功能、步行能力、认知功能、平衡及日常生活能力进行评估。此外, 本研究还从试验组中选出了 6 例右半球脑卒中患者, 分别隔日进行认知-运动双任务训练和下肢康复机器人辅助下的认知-运动双任务训练, 在干预前后采用近红外脑功能成像技术采集相关信号, 进行静息态脑功能网络连接分析。**结果** 两组患者干预后 FMA-LE、FAC、BBS、MBI 评分均较组内干预前改善, 且试验组干预后 FMA-LE[(27.71±6.00)分]、FAC[(3.74±1.03)分]、BBS[(48.39±7.90)分]、MBI 评分[(86.68±11.60)分]显著高于对照组($P<0.05$)。在认知功能评估方面, 两组患者的 DST 顺背(DST-F)和倒背(DST-B)评分组内及组间比较, 差异均无统计学意义($P>0.05$)。基于近红外脑功能成像的脑网络功能连接分析结果显示, 患者在下肢康复机器人辅助下的双任务训练中, 左侧前额叶(PFC)与左侧运动前区-辅助运动区(PMC/SMA)间的功能连接强度增加($P<0.05$)。**结论** 下肢康复机器人辅助下的双任务训练可有效提高脑卒中患者的下肢运动功能及步行能力, 改善平衡功能和日常生活能力, 这种变化可能与下肢康复机器人引发的健侧半球 PFC-PMC/SMA 功能联系增强有关。

【关键词】 脑卒中; 机器人; 双任务训练; 近红外脑功能成像; 步行能力

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFC2009700, 2022YFC2009706); 国家自然科学基金青年项目(82102663)

DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2024.02.003

Improving the lower limb functioning and walking ability of stroke survivors with robot-assisted dual-task training

Xie Erkang, Cong Yangyang, Wang Yuyuan, Hua Yan, Wang Weining, Bai Yulong

Department of Rehabilitation Medicine, Huashan Hospital Affiliated to Fudan University, Shanghai 200040, China

Corresponding author: Bai Yulong, Email: dr_baiyl@fudan.edu.cn

【Abstract】 Objective To explore the effects of dual task training assisted by a lower limb rehabilitation robot on lower extremity mobility and the walking ability of stroke survivors. **Methods** Sixty-one stroke survivors were randomly divided into a control group and an experimental group with 30 in the control group and 31 in the experimental group. In addition to routine exercise training and physical therapy, both groups were given cognitive-motor dual task training 5 times a week for 3 weeks. But only in the experimental group was the dual task training assisted by a lower limb rehabilitation robot. Both groups' lower limb motor function, walking ability, cognition, balance and ability in the activities of daily living were evaluated before and after the experiment using the Fugl-Meyer lower extremity assessment (FMA-LE), functional ambulation categories (FAC), the digital span test (DST), the Berg Balance Scale (BBS) and the Modified Barthel Index (MBI). Additionally, 6 survivors of a right hemisphere stroke from the experimental group received cognitive-motor dual task training both with and without the robotic assistance alternately. Near-infrared functional brain imaging was applied before and after the intervention, and the functional network connectivity of the resting brains was analyzed. **Results** After the intervention the average FMA-LE, FAC, BBS and MBI scores had improved in both groups, with the improvement in the experimental group significantly better than in the control

group on average. In terms of cognition there was no significant difference in the DST forward and backward assessment results between the two groups. The analysis of brain network functional connectivity showed that the intensity of functional connectivity between the left prefrontal cortex (PFC) and the left premotor cortex and supplementary motor cortex (PMC/SMA) increased significantly more, on average, after training assisted by the robot. **Conclusion** Dual task training with the assistance of a lower limb rehabilitation robot can effectively improve the lower limb motor function, walking, balance and ability in the activities of daily living of stroke survivors. Enhanced functional connection of the PFC and the PMC/SMA in the healthy hemisphere induced by the robot may be the cause.

【Key words】 Stroke; Robotics; Dual-task training; Functional near-infrared spectroscopy; Walking ability

Funding: China's National Key Research and Development Program (2022YFC2009700, 2022YFC2009706); the National Natural Science Foundation Youth Program (project 82102663)

DOI:10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2024.02.003

脑卒中是全球范围内威胁人类健康的重大疾病之一^[1],且已成为导致中国人死亡和残疾的主要原因^[2]。脑卒中患者常遗留不同程度的运动、平衡、认知、感觉功能障碍^[3-5]。其中,脑卒中后的步行功能障碍更是直接影响到患者出院后的日常活动和社会参与能力。有研究指出,脑卒中发生 1 年后有 50% 的幸存者不能完成 6 min 步行测试,能够完成测试的患者的步行能力也仅能达到预测值的 40%^[6]。因此,如何提高患者的步行功能和将治疗作用转化至实际生活中是非常值得关注的问题。双任务训练是指在进行一项任务训练的过程中,同步进行另外一项或者多项活动,物理治疗中的双任务训练通常包含主要运动任务和附带注意力训练两个成分^[7]。有研究报道,在边走路边思考等日常生活场景下的双任务活动中,脑卒中患者的平衡和步行能力下降^[8]。

本研究将基于下肢康复机器人的双任务训练作用于脑卒中患者,观察其对患者下肢运动功能、步行能力、认知功能、平衡及日常生活能力的影响,并采用近红外脑功能成像技术观察双任务训练下患者的静息态脑功能网络连接情况,旨在为双任务步行训练方案的开发提供参考依据。

对象与方法

一、研究对象

纳入标准:①符合《中国急性缺血性脑卒中诊治指南 2018》和《中国脑出血诊治指南(2019)》制订的脑卒中诊断标准^[9-10];②首次脑卒中,并经头颅 CT 或 MRI 证实;③年龄 21~70 岁;④病程 1~6 个月,目前病情稳定;

⑤立位平衡达到自动态平衡,具备站立位平衡训练条件;⑥在下肢康复机器人协助下,可以保持躯干稳定且完成原地踏步运动;⑦功能性步行量表(functional ambulation classification, FAC)分级 \leq 4 级;⑧自愿签署知情同意书。排除标准:①合并严重心、肺、肝、肾功能不全,不宜进行康复训练者;②可逆性脑卒中、脑干卒中、小脑卒中、单侧忽略、Pusher 综合征患者;③简易精神状态量表(mini-mental state examination, MMSE) $<$ 24 分的认知功能障碍者;④有精神疾患,不能配合训练者;⑤聋哑患者;⑥无法在定点医院接受治疗和定期随访者。

选取 2019 年 10 月至 2023 年 6 月在复旦大学附属华山医院住院的脑卒中患者 70 例,按照随机数字表法将其分为对照组和试验组,每组 35 例。研究期间有 9 例患者脱落(因个人原因出院、转院),最终对照组 30 例、试验组 31 例患者完成了研究。两组患者的性别、平均年龄、平均病程、卒中类型、卒中侧别等一般资料比较,差异无统计学意义($P>0.05$),具有可比性,详见表 1。本研究已通过复旦大学附属华山医院伦理委员会批准[伦理审查批件号(2017)临审第(368)号]。

二、治疗方法

两组患者均接受常规物理治疗、作业治疗以及必要的吞咽和言语功能训练,每日 2~3 h。对照组在此基础上增加认知-运动双任务训练,试验组增加下肢康复机器人辅助下的认知运动双任务训练(图 1)。两组患者训练时,运动任务训练和认知任务训练必须同步进行,要求最大训练强度不得明显影响双任务训练的完成流畅度。双任务训练每次 30 min,中间可适当休息,每日 1 次,每周 5 d,持续 3 周,共 15 次。

表 1 两组患者的一般资料

组别	例数	性别(例)		平均年龄 (岁, $\bar{x}\pm s$)	平均病程 (月, $\bar{x}\pm s$)	卒中类型(例)		卒中侧别(例)	
		男	女			缺血性	出血性	左侧	右侧
对照组	30	17	13	57.80 \pm 11.63	3.03 \pm 2.85	17	13	10	20
试验组	31	16	15	53.52 \pm 7.68	4.13 \pm 3.70	17	14	13	18



图 1 下肢康复机器人辅助下的双任务训练

认知训练任务:①计算——在患者完成下肢运动训练的过程中,同步进行加减法计算,嘱患者进行连续的加减法练习,如“1 加 3、再加 3”,“100 减 3、再减 3”等;②言语沟通——步行中和患者交流当日计划,要求患者给出明确的、可拓展的问题答复,而非简短的指令回复;③听觉反馈——嘱患者在行走时听到含有某一数字(3 或 4)的声音时,举起健侧手;或要求患者在听到某一数字时,回答出前面 1 位或者 3 位数字。训练过程中,记录患者的执行正确率,并在每次双任务训练结束后及时向患者反馈。

运动训练任务:包括平衡杠内的坐站转移、重心移动、迈步/撤步姿势维持和不同支撑相维持等,同时视患者功能状况逐步进阶,进行原地踏步、迈步、撤步和步行等训练。一旦患者能够完成双手辅助下的跑台步行,立即进阶至跑台上进行步行训练。

试验组采用中国上海产 SE-NaturalGait 下肢康复机器人进行双任务训练。该机器人具有以下特点:①可根据患者身体重量进行个性化精确减重;②骨盆减重,设有保护性高度,可预防跌倒;③上肢和躯干无束缚,不干扰自然步态;④具有定速行走、跑台跟随行走、跑台抗阻行走多模式。本研究中所设定的减重量根据患者的实际情况具体调整,减重范围为减去自身体重的 0%~40%,要求能够保证患者完成原地踏步动作即可。此外,根据患者耐受程度,进行原地踏步练习适应后随即转入恒定步速行走训练,速度范围为 0.1~1.2 m/s。

三、评估方法

干预前和干预 3 周后(干预后),由 1 名不知晓研究分组的康复医师对两组患者开展评估。采用 Fugl-Meyer 下肢运动功能评分(Fugl-Meyer assessment-lower extremities, FMA-LE)、FAC、数字广度测试(digit span test, DST)、Berg 平衡量表(Berg balance scale, BBS)、改良 Barthel 指数(modified Barthel index, MBI)对两组

患者的下肢运动功能、步行能力、认知功能、平衡及日常生活能力进行评估。

量表评估内容包括:①FMA-LE——共 17 项,每项分 3 级并依次记为 0、1、2 分,总分 34 分,得分越高,表示下肢的主动运动及分离运动功能越好^[11];②FAC——分为 6 级,分数越高,表示步行功能越好。0 级,不能行走或需 2 人或更多人帮助才能行走;1 级,需在 1 人帮助其减轻负重及扶持情况下行走;2 级,需在 1 人连续或间断扶持下行走;3 级,需在他人监护下行走;4 级,能平地上行走,但上下楼、上下斜坡或在不平坦地面上行走时需要帮助;5 级,能独立行走^[12];③DST——分为顺背(digit span forward, DST-F)和倒背(digit span backward, DST-B)两个部分。DST-F 用于评价患者的注意力和瞬时记忆能力,DST-B 用于评价患者执行功能中的工作记忆部分。DST-F 和 DST-B 最高分均为 12 分,分数越高,表示功能越好。在测试过程中要求患者按照顺序或倒序复述数字,分别记录正确的数目^[13];④BBS——最高分 56 分,主要用于评估患者的身体平衡能力,分数越高,表示平衡功能越好,低于 40 分提示跌倒风险较高^[14];⑤MBI——共 10 项,满分 100 分,分数越高,表示日常生活独立能力越强^[15]。

四、静息态脑功能网络连接分析

本研究从试验组选出 6 例右半球脑卒中患者,均为男性,分别隔日进行认知-运动双任务训练和下肢康复机器人辅助下的认知-运动双任务训练。采用中国产 NirSmart 功能性近红外光谱设备,基于脑部含氧血红蛋白/脱氧血红蛋白的含量变化,进行静息态脑功能网络连接分析。测试方案的探头排布参考 10/20 国际标准导联系统进行设计,包含 23 个光源和 15 个接收器,组成 47 个有效通道,接收器与光源间距离为 29~31 mm,设备采样率为 11 Hz,主要覆盖双侧额顶叶。测试时,患者取舒适坐位,待安静后佩戴头帽,要求其扫描期间尽量保持放松。分别于干预前、干预后即刻,进行 6 min 的信号采集^[16]。数据分析时,将 47 个通道根据左右半球定位,划分为前额叶(prefrontal cortex, PFC)和运动前区(premotor cortex, PMC)/辅助运动区(supplementary motor cortex, SMA)以及初级运动皮质(primary motor cortex, M1),共计左右 6 个感兴趣区(regions of interest, ROI)用于分析。

近红外光谱数据处理采用 NirSpark 软件进行。在消除运动伪影、将原始光强信号转换成光密度曲线和进行带通滤波器过滤后,再将光密度数据转换成氧合血红蛋白(oxygen-hemoglobin, HbO₂)、脱氧血红蛋白(deoxygen-hemoglobin, HbR)的浓度^[17]。利用 NirSpark 软件的 Network 模块来提取各时间点 HbO₂

浓度变化,分析各通道 HbO₂ 浓度在时间序列上的 Pearson 相关系数,再经 Fisher-Z 转换,定义通道间的功能连接强度。

五、统计学方法

采用 SPSS 22.0 版统计学软件进行数据分析。计量资料以均值±标准差 ($\bar{x} \pm s$) 形式描述,用 Shapiro-Wilk 法作正态性检验,用 Levene 检验确定方差齐性。计数资料采用 Pearson 卡方检验,近似正态分布的计量资料采用独立样本 *t* 检验。对所有结局变量使用协方差分析进行相关处理,将指标对应的基线信息作为协变量,分组作为固定因子,结局指标作为因变量纳入分析模型,并报告其矫正后的均值及边界预测值。不符合正态分布的数据组间比较采用两独立样本的秩和检验 (Mann-Whitney U), 组内干预前后比较采用两配对样本的秩和检验 (Wilcoxon 符号秩和检验), 计算统计量 *Z*。缺失值用同组类似功能状态的患者数据进行填补。*P*<0.05 表示差异有统计学意义。

结 果

一、两组患者干预前后下肢运动功能、步行能力、

认知功能、平衡及日常生活能力比较

干预前,两组患者的 FMA-LE、FAC、DAT-F、DST-B、BBS、MBI 评分比较,差异均无统计学意义 (*P*>0.05)。两组患者干预后 FMA-LE、FAC、BBS、MBI 评分均较组内干预前改善,且试验组干预后 FMA-LE、FAC、BBS、MBI 评分显著高于对照组 (*P*<0.05)。两组患者 DST-F、DST-B 评分组内及组间比较,差异均无统计学意义 (*P*>0.05)。详见表 2。

二、静息态脑功能网络连接情况

从试验组选出的 6 例患者中,包含脑梗死 2 例、脑出血 4 例,平均年龄为 (56.00±10.84) 岁,平均病程为 (7.67±5.16) 个月,均为右侧脑卒中。患者接受下肢康复机器人辅助下的双任务训练后,左侧 PFC 与左侧 PMC-SMA 间的功能连接强度增加 (*P*<0.05),其它 ROI 间的功能强度无明显变化 (*P*>0.05)。患者在接受无下肢康复机器人辅助下的双任务训练后,上述 ROI 间的功能强度无明显变化 (*P*>0.05)。提示下肢康复机器人辅助下的双任务训练明显提高了患者健侧半球 PFC 与 PMC-SMA 的联系强度。具体各功能区的联系变化,详见表 3。

表 2 两组患者干预前后下肢运动功能、步行能力、认知功能、平衡及日常生活能力比较 (分, $\bar{x} \pm s$)

组别	例数	FMA-LE	FAC	DST-F	DST-B	BBS	MBI
对照组							
干预前	30	18.67±7.22	2.03±1.00	6.20±1.69	4.43±1.41	31.83±12.33	52.50±16.88
干预后	30	22.90±6.64 ^a	2.87±0.94 ^a	6.70±1.60	5.00±1.34	38.33±11.92 ^a	65.53±17.07 ^a
试验组							
干预前	31	20.52±7.13	2.13±1.12	5.52±1.79	2.90±1.47	35.52±13.56	64.23±15.99
干预后	31	27.71±6.00 ^{ab}	3.74±1.03 ^{ab}	6.32±1.85	4.26±1.71	48.39±7.90 ^{ab}	86.68±11.60 ^{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 3 基于近红外脑功能成像技术的感兴趣区功能连接分析结果 ($\bar{x} \pm s$)

不同任务	R-PFC/ L-PFC	R-PFC/ R-M1	R-PFC/ L-M1	R-PFC/ R-PMC-SMA	R-PFC/ L-PMC-SMA	L-PFC/ R-M1	L-PFC/ L-M1	L-PFC/ R-PMC-SMA
双任务训练								
干预前	0.52±0.23	0.34±0.20	0.42±0.18	0.47±0.22	0.30±0.20	0.43±0.15	0.54±0.15	0.52±0.21
干预后	0.47±0.11	0.51±0.14	0.37±0.16	0.53±0.15	0.44±0.17	0.40±0.18	0.34±0.17	0.43±0.17
下肢康复机器人辅助下的双任务训练								
干预前	0.43±0.22	0.30±0.21	0.33±0.22	0.38±0.25	0.21±0.18	0.41±0.15	0.47±0.20	0.45±0.18
干预后	0.53±0.17	0.46±0.09	0.30±0.20	0.50±0.14	0.46±0.15	0.38±0.13	0.34±0.21	0.41±0.18
不同任务	L-PFC/ L-PMC-SMA	R-M1/ L-M1	R-M1/ R-PMC-SMA	R-M1/ L-PMC-SMA	L-M1/ R-PMC-SMA	L-M1/ L-PMC-SMA	R-PMC-SMA/ L-PMC-SMA	
双任务训练								
干预前	0.38±0.22	0.56±0.04	0.63±0.09	0.33±0.20	0.58±0.14	0.41±0.33	0.34±0.24	
干预后	0.39±0.18	0.48±0.18	0.75±0.10	0.67±0.14	0.51±0.20	0.50±0.21	0.68±0.15	
下肢康复机器人辅助下的双任务训练								
干预前	0.27±0.17	0.53±0.04	0.63±0.11	0.26±0.14	0.47±0.13	0.30±0.16	0.31±0.22	
干预后	0.42±0.21 ^a	0.40±0.23	0.70±0.10	0.57±0.10	0.37±0.29	0.44±0.23	0.54±0.18	

注:与同任务干预前比较,^a*P*<0.05

讨 论

脑卒中患者除存在不同程度的运动障碍外,还会表现出明显的认知能力下降,其在认知资源总量和注意力分配方面。均有一定的缺陷^[14]。一旦执行任务难度增加或所需分配的注意力超过其本身能力时,就会出现任务表现能力的明显不足^[18-20]。认知能力与运动功能的关系密切,提升认知功能有助于改善步行能力和预防跌倒,而积极进行步行训练也能够一定程度上促进认知能力的改善^[21]。有研究报道,采用认知联合运动的双任务训练可有效提高脑卒中患者的运动功能、注意力及其分配能力^[22]。包含了步行训练的双任务干预能够持续促进姿势调整,以保持平衡,强化步行记忆,使步行姿势调节趋于自动化,可更好地提高患者的运动功能^[23]。既往的双任务训练研究大多是针对脑卒中后遗症期患者,且要求患者的步行能力至少能够达到辅助下步行 10 m 以上^[24-25]。本研究以下肢康复机器人为步行载体,给尚未达到步行训练条件的脑卒中早期患者提供有效的步行训练机会,同时开展认知任务的训练,结果发现下肢康复机器人辅助下的双任务训练可以有效提高脑卒中患者的下肢运动功能、步行能力、平衡及日常生活能力,与既往的研究结果一致^[26-28]。提示下肢康复机器人辅助下的双任务训练在提升脑卒中患者功能方面的优势较强。

下肢康复机器人为试验组患者的骨盆部位提供了有力支撑,相较于其它减重方式,其对下肢、躯干上部、上肢无束缚,支持全身各个关节在步行过程中同步复现自然运动中的摆动节律,更符合人体自然步行状态。有研究指出,这种基于人体自然运动设计的动作可以更好地促进运动功能的恢复^[29]。此外,这些关节的协调运动对于维持平衡和促进步行功能的恢复都有所助益^[30]。脑卒中患者的身体机能存在运动、平衡缺陷,当面临复杂任务的挑战时,其对跌倒的恐惧心理可能会大幅增加患者的注意力,进而影响步态,使得以步行为运动任务的双任务训练不能进行或者收效甚微^[31]。本研究所采用的下肢康复机器人设有保护性高度,具有防跌倒作用,能够减轻患者的心理负担,有助于双任务训练的顺利进行。

本研究采用近红外脑功能成像技术,对 6 例脑卒中患者进行了脑功能网络连接分析,结果显示患者在下肢康复机器人辅助下的双任务训练中,左侧 PFC 与左侧 PMC-SMA 间的功能连接强度明显增加,提示下肢康复机器人辅助下的双任务训练能够更好地调动健侧半球的神经网络,进而参与脑功能的重塑。人脑 PFC 和 SMA 在自主运动的准备和计划中起关键作

用^[32]。既往研究指出,脑卒中患者的健侧 PMC/SMA 会在损伤后表现出较高的兴奋性,且与损伤程度密切相关^[33-34]。而本研究中 PFC 与其联系增强的这一结果,进一步提示此种较高的兴奋性可能来源于同侧 PFC 带来的易化效应,在下肢康复机器人的辅助下,患者的运动准备和执行能力很可能得到了潜在提升,并通过健侧半球 PFC 的兴奋性表现出来。

本研究中,两组患者的认知功能并未得到明显提升,这一结论与既往研究不一致^[35-36]。未见明显差异的原因可能是两组患者的认知功能水平均较好,且认知训练任务相同,干预效果类似。此外,由于认知的维度较多,而 DST-F 和 DST-B 评价相对简单,并不能精确反映出认知水平的改变,后期将考虑引入功能性磁共振等更高分辨率的分析技术进行深入探讨。

本研究存在一定的局限性,干预周期偏短且未进行长期随访,仅观察了下肢康复机器人双任务训练的短期影响。此外,在利用近红外脑功能成像技术开展脑功能网络连接分析时,仅观察了静息态的即刻效应,并未涉及任务态,且未能完成干预后的脑功能变化分析。在今后的研究中,会纳入更多患者并设计相应的任务态或静息态脑功能网络研究,以深入观察脑功能网络变化与运动、认知功能之间的关系,并探讨不同损伤位置对研究结果的影响。

综上所述,下肢康复机器人辅助下的双任务训练能够有效提高脑卒中患者的下肢运动功能与行走能力,促进平衡和日常活动能力的提升,这种改善效果可能得益于健侧半球 PFC-PMC/SMA 联系的增强。本研究结果为下肢康复机器人的双任务运动训练范式和相关机制研究提供了一定的依据,有望为下肢康复机器人的治疗方案优化提供帮助。

参 考 文 献

- [1] Owolabi MO, Thrift AG, Martins S, et al. The state of stroke services across the globe: report of World Stroke Organization-World Health Organization surveys[J]. *Int J Stroke*, 2021, 16(8): 889-901. DOI: 10.1177/17474930211019568.
- [2] Tu WJ, Wang LD, Special Writing Group of China Stroke Surveillance Report. China stroke surveillance report 2021[J]. *Mil Med Res*, 2023, 10(1): 33. DOI: 10.1186/s40779-023-00463-x.
- [3] Smith PS, Thompson M. Treadmill training post stroke: are there any secondary benefits? A pilot study [J]. *Clin Rehabil*, 2008, 22(10-11): 997-1002. DOI: 10.1177/0269215508088988.
- [4] Su D, Hu Z, Wu J, et al. Review of adaptive control for stroke lower limb exoskeleton rehabilitation robot based on motion intention recognition[J]. *Front Neurobot*, 2023, 17: 1186175. DOI: 10.3389/fnbot.2023.1186175.
- [5] Sheng R, Chen C, Chen H, et al. Repetitive transcranial magnetic stimulation for stroke rehabilitation: insights into the molecular and cellular mechanisms of neuroinflammation[J]. *Front Immunol*, 2023, 14: 1197422. DOI: 10.3389/fimmu.2023.1197422.

- [6] Lo WA, Chen D, Zhao J, et al. The efficacy of interlimb-coordinated intervention on gait and motor function recovery in patients with acute stroke: a multi-center randomized controlled trial study protocol [J]. *Brain Sci*, 2021, 11(11):1495. DOI: 10.3390/brainsci11111495.
- [7] Wong PL, Yang YR, Tang SC, et al. Comparing different montages of transcranial direct current stimulation on dual-task walking and cortical activity in chronic stroke: double-blinded randomized controlled trial [J]. *BMC Neurol*, 2022, 22(1):119. DOI: 10.1186/s12883-022-02644-y.
- [8] Cockburn J, Haggard P, Cock J, et al. Changing patterns of cognitive-motor interference (CMI) over time during recovery from stroke [J]. *Clin Rehabil*, 2003, 17(2): 167-173. DOI: 10.1191/0269215503cr597oa.
- [9] 中华医学会神经病学分会, 中华医学会神经病学分会脑血管病学组. 中国急性缺血性脑卒中诊治指南 2018 [J]. *中华神经科杂志*, 2018, 51(9): 666-682. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1006-7876.2018.09.004.
- [10] 中华医学会神经病学分会, 中华医学会神经病学分会脑血管病学组. 中国脑出血诊治指南 (2019) [J]. *中华神经科杂志*, 2019, 52(12): 994-1005. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1006-7876.2019.12.003.
- [11] Hernández ED, Forero SM, Galeano CP, et al. Intra- and inter-rater reliability of Fugl-Meyer assessment of lower extremity early after stroke [J]. *Braz J Phys Ther*, 2021, 25(6): 709-718. DOI: 10.1016/j.bjpt.2020.12.002.
- [12] Hayashi Y, Yamazaki K, Takeda K, et al. The development of ambulation independence measure: a new measurement tool to assess gait ability in acute stroke patients [J]. *NeuroRehabilitation*, 2022, 50(4): 409-416. DOI: 10.3233/NRE-210289.
- [13] Geva S, Truneh T, Seghier ML, et al. Lesions that do or do not impair digit span: a study of 816 stroke survivors [J]. *Brain Commun*, 2021, 3(2): fcab031. DOI: 10.1093/braincomms/fcab031.
- [14] Berg K, Wood-Dauphinee SL, Williams JL, et al. Measuring balance in the elderly: validation of an instrument [J]. *Can J Public Health*, 1992, 83: S7-S11.
- [15] Leung SO, Chan CC, Shah S. Development of a Chinese version of the modified Barthel index—validity and reliability [J]. *Clin Rehabil*, 2007, 21(10): 912-922. DOI: 10.1177/0269215507077286.
- [16] Shi S, Qie S, Wang H, et al. Recombination of the right cerebral cortex in patients with left side USN after stroke: fNIRS evidence from resting state [J]. *Front Neurol*, 2023, 14: 1178087. DOI: 10.3389/fneur.2023.1178087.
- [17] Geng S, Liu X, Biswal BB, et al. Effect of resting-state fNIRS scanning duration on functional brain connectivity and graph theory metrics of brain network [J]. *Front Neurosci*, 2017, 11: 392. DOI: 10.3389/fnins.2017.00392.
- [18] Sim SM, Oh DW. Effect of dual-task training with cognitive motor task on walking and balance functions in patients with chronic stroke: randomized controlled pilot study [J]. *Phys Ther Korea*, 2015, 22: 11-20.
- [19] Ruthruff E, Pashler HE, Klaassen A. Processing bottlenecks in dual-task performance: structural limitation or strategic postponement [J]. *Psychon Bull Rev*, 2001, 8(1): 73-80. DOI: 10.3758/bf03196141.
- [20] Yogev-Seligmann G, Hausdorff JM, Giladi N. The role of executive function and attention in gait [J]. *Mov Disord*, 2008, 23(3): 329-342. DOI: 10.1002/mds.21720.
- [21] Shin SS, An DH. The effect of motor dual-task balance training on balance and gait of elderly women [J]. *J Phys Ther Sci*, 2014, 26(3): 359-361. DOI: 10.1589/jpts.26.359.
- [22] Hwang WJ, Cho MK, Chung Y. Relationship between anticipatory postural adjustment of the trunk, dual tasks and physical performance with chronic stroke survivors: a pilot test [J]. *Phys Ther Rehabil Sci*, 2015, 4: 44-48.
- [23] Amhoni M, Barone P, Hausdorff JM. Cognitive contributions to gait and falls: evidence and implications [J]. *Mov Disord*, 2013, 28(11): 1520-1533. DOI: 10.1002/mds.25674.
- [24] Kim H, Lee H. The effects of dual-motor task training on the gait ability of chronic stroke patients [J]. *J Phys Ther Sci*, 2013, 25(3): 317-320.
- [25] Kim K, Lee DK, Kim EK. Effect of aquatic dual-task training on balance and gait in stroke patients [J]. *J Phys Ther Sci*, 2016, 28(7): 2044-2047. DOI: 10.1589/jpts.28.2044.
- [26] Wang XQ, Pi YL, Chen BL, et al. Cognitive motor interference for gait and balance in stroke: a systematic review and meta-analysis [J]. *Eur J Neurol*, 2015, 22(3): 555-537. DOI: 10.1111/ene.12616.
- [27] Kim GY, Han MR, Lee HG. Effect of dual-task rehabilitative training on cognitive and motor function of stroke patients [J]. *J Phys Ther Sci*, 2014, 26(1): 1-6. DOI: 10.1589/jpts.26.1.
- [28] Nosaka S, Imada K, Saita K, et al. Prefrontal activation during dual-task seated stepping and walking performed by subacute stroke patients with hemiplegia [J]. *Front Neurosci*, 2023, 17: 1169744. DOI: 10.3389/fnins.2023.1169744.
- [29] Chen ZJ, He C, Xu J, et al. Exoskeleton-assisted anthropomorphic movement training for the upper limb after stroke: the EAMT randomized trial [J]. *Stroke*, 2023, 54(6): 1464-1473. DOI: 10.1161/STROKEAHA.122.041480.
- [30] Iosa M, Fusco A, Morone G, et al. Development and decline of upright gait stability [J]. *Front Aging Neurosci*, 2014, 6: 14. DOI: 10.3389/fnagi.2014.00014.
- [31] Aihara S, Kitamura S, Dogan M, et al. Patients' thoughts on their falls in a rehabilitation hospital: a qualitative study of patients with stroke [J]. *BMC Geriatr*, 2021, 21(1): 713. DOI: 10.1186/s12877-021-02649-1.
- [32] Thickbroom GW, Byrnes ML, Sacco P, et al. The role of the supplementary motor area in externally timed movement: the influence of predictability of movement timing [J]. *Brain Res*, 2000, 874(2): 233-241. DOI: 10.1016/S0006-8993(00)02588-9.
- [33] Ward NS, Brown MM, Thompson AJ, et al. Neural correlates of motor recovery after stroke: a longitudinal fMRI study [J]. *Brain*, 2003, 126(11): 2476-2496. DOI: 10.1093/brain/awg245.
- [34] Brihmat N, Tari M, Gasq D, et al. Cross-modal functional connectivity of the premotor cortex reflects residual motor output after stroke [J]. *Brain Connect*, 2020, 10(5): 236-249. DOI: 10.1089/brain.2020.0750.
- [35] In-Wook L, Kim Y, Lee D. Effect of a virtual reality exercise program accompanied by cognitive tasks on the balance and gait of stroke patients [J]. *J Phys Ther Sci*, 2015, 27(7): 2175-2177. DOI: 10.1589/jpts.27.2175.
- [36] An H, Kim J, Kim Y, et al. The effect of various dual task training methods with gait on the balance and gait of patients with chronic stroke [J]. *J Phys Ther Sci*, 2014, 26(8): 1287-1291. DOI: 10.1589/jpts.26.1287.