

# 脑卒中偏瘫步态的生物力学特征及 康复研究进展

陈忆林<sup>1</sup>, 王振宇<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>重庆医科大学附属永川医院, 重庆

<sup>2</sup>重庆医科大学附属康复医院, 重庆

收稿日期: 2026年4月5日; 录用日期: 2026年5月5日; 发布日期: 2026年5月13日

## 摘要

脑卒中后偏瘫步态严重影响患者的独立移动能力、日常生活活动能力及社会参与度。由于上运动神经元受损引起的肌力减退、肌肉痉挛及异常协同运动模式, 偏瘫患者的步态在时空、运动学和动力学参数上表现出极度的不对称性与低效性。准确量化这些生物力学特征是制定精准康复策略的前提。在康复干预方面, 除了传统的物理治疗与下肢机器人技术外, 针对近端腰骨盆复合体的体外冲击波(ESWT)靶向干预, 以及虚拟现实(VR)和脑机接口(BCI)等前沿神经调控技术, 正逐渐成为重塑偏瘫步态的新焦点。

## 关键词

脑卒中, 偏瘫步态, 生物力学, 三维步态分析, 体外冲击波, 虚拟现实, 脑机接口

# Biomechanical Characteristics and Rehabilitation Research Progress of Hemiplegic Gait Following Stroke

Yilin Chen<sup>1</sup>, Zhenyu Wang<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Yongchuan Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing

<sup>2</sup>Rehabilitation Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing

Received: April 5, 2026; accepted: May 5, 2026; published: May 13, 2026

## Abstract

**Hemiplegic gait after stroke severely impairs patients' independent mobility, activities of daily**

\*通讯作者。

文章引用: 陈忆林, 王振宇. 脑卒中偏瘫步态的生物力学特征及康复研究进展[J]. 亚洲急诊医学病例研究, 2026, 14(2): 274-281. DOI: 10.12677/acrem.2026.142034

living, and social participation. Due to muscle weakness, muscle spasticity, and abnormal synergistic movement patterns caused by upper motor neuron lesions, the gait of hemiplegic patients exhibits profound asymmetry and inefficiency across spatiotemporal, kinematic, and kinetic parameters. The accurate quantification of these biomechanical characteristics is a prerequisite for formulating precise rehabilitation strategies. Regarding rehabilitation interventions, in addition to traditional physical therapy and lower limb robotic technologies, targeted interventions using Extracorporeal Shock Wave Therapy (ESWT) on the proximal lumbopelvic complex, as well as cutting-edge neuromodulation technologies such as Virtual Reality (VR) and Brain-Computer Interfaces (BCI), are gradually emerging as new focal points for reshaping hemiplegic gait.

## Keywords

Stroke, Hemiplegic Gait, Biomechanics, Three-Dimensional Gait Analysis, Extracorporeal Shock Wave, Virtual Reality, Brain-Computer Interface

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

脑卒中是全球范围内导致成人长期残疾的首要原因。据统计,约有70%~80%的脑卒中幸存者在发病初遗留有不同程度的下肢运动功能障碍。正常步行的实现依赖于中枢神经系统对躯干和下肢各关节肌群精细的运动控制与动态协调。然而,脑卒中引发的上运动神经元综合征打破了这一平衡,导致患侧肢体出现肌力下降、牵张反射亢进及痉挛等病理改变,最终形成特征性的偏瘫步态(Hemiplegic gait) [1]。研究方法:本文是一篇旨在整合脑卒中偏瘫步态前沿观点的叙述性综述。文献检索主要依托PubMed、Web of Science、Embase及中国知网(CNKI)等核心数据库,检索时间范围聚焦于近五年,关键词涵盖“Stroke”、“Hemiplegic gait”、“3D gait analysis”、“Extracorporeal shock wave therapy”、“Virtual reality”及“Brain-computer interface”等。通过梳理高质量文献,本文旨在系统探讨偏瘫步态的生物力学特征、评估技术的演进及康复干预的最新进展。

## 2. 脑卒中偏瘫步态的生物力学特征

偏瘫步态的本质是肌肉无力(Weakness)与肌肉痉挛(Spasticity)相互交织,导致正常生理运动程序被打破,并引发一系列异常的机体代偿行为。现代生物力学通过时空参数、运动学及动力学三个维度对其进行了精准的解构。

### 2.1. 时空参数特征

不对称性是偏瘫步态在时空参数上最显著的标志。为了规避患侧下肢的承重,患者常表现为患侧单支撑期显著缩短,健侧支撑期相对延长[2]。同时,患者会延长双支撑期占比以维持稳定。偏瘫患者的自然步速通常仅为正常人的40%~60%,且步幅变小、步宽增加[3]。

### 2.2. 运动学特征

骨盆与躯干的近端代偿,偏瘫患者由于患侧髌膝屈曲受限,在预摆动期常被迫利用患侧腰方肌和竖脊肌过度收缩产生“骨盆上提(Pelvic hiking)”,或产生“画圈步态”,以完成下肢的空间廓清[4]。膝关

节(膝关节僵硬步态): 摆动相最常见的运动障碍, 表现为膝关节屈曲角度峰值显著降低且出现延迟。在支撑相, 常表现出代偿性的膝关节过伸以维持承重稳定。踝关节(足下垂与内翻): 受到肌肉无力及痉挛的双重影响, 摆动相常出现足下垂及足内翻, 破坏了足底向前的滚动推进机制。

### 2.3. 动力学特征

偏瘫患者最核心的动力学缺失在于“推进动能(Propulsion)的急剧下降”, 患侧踝关节在站立末期的功率峰值严重缩水甚至消失。此外, 由于近端骨盆僵硬“锁死”, 动量无法有效传递, 导致患侧下肢难以积蓄和释放足够的摆动功率[5]。这使得患者步行能量消耗较正常人高出 1.5 至 2 倍。

### 3. 偏瘫步态的客观化评估技术演进

准确量化上述异常特征, 是验证康复疗效的前提。以下是目前主流评估技术的系统性对比(见表 1)。

**Table 1.** A systematic comparison of mainstream gait assessment technologies for hemiplegic stroke patients

**表 1.** 脑卒中偏瘫患者步态主流评估技术的系统性对比

评估技术类别	代表性工具	信效度水平	主要优势	局限性与争议点	适用场景
临床量表	FAC, BBS, 10MWT	较高, 但易受主观影响	操作简便快捷, 能迅速分级患者的步行独立性与跌倒风险	存在“天花板效应”, 无法量化异常的关节角度和发力细节	常规门诊初筛、临床疗效大样本快速评估
光电三维步态分析	Vicon 系统	极高, 公认的“金标准”	提供极其精确的三维运动学和动力学数据	设备昂贵, 数据后处理繁琐; 测试中极易产生“实验室效应”	实验室环境下的高精度生物力学机制剖析
穿戴式传感器	基于 IMU 的系统	时空参数与金标准高度一致	无场地限制, 在评估长距离摆动功率及能量消耗方面具有临床优势[6]	部分复杂动力学参数的提取精度仍需核心算法的进一步完善	真实生活环境下的自然步态监测与长距离随访

### 4. 偏瘫步态的康复干预研究进展

脑卒中后的步态康复是一个从外周肌肉控制到中枢神经重塑的系统性工程。随着康复医学的演进, 早期的单一手法干预已逐渐向高强度、任务导向的技术辅助训练转型。

#### 4.1. 传统物理疗法对步态康复的影响与局限

脑卒中早期的步态干预高度依赖神经发育学疗法(如 Bobath 概念、Brunnstrom 技术)、本体感觉神经肌肉易化术(PNF)以及常规的下肢肌力强化与关节活动度训练。这些方法通过治疗师的手法诱导, 重点在于抑制患肢的异常痉挛模式, 诱发分离运动, 并重新建立大脑对瘫痪肢体的自主控制[7]。尽管传统手法在纠正代偿姿势和应对局部肌张力异常方面不可替代, 但脑卒中后的“神经可塑性重塑”(Neuroplasticity)本质上依赖于高频次、大剂量的任务导向性重复。研究表明, 单靠治疗师的体力和时间, 极难在常规治疗时段内达到有效重塑神经网络所需的步态循环次数(通常需要成百上千次)。这种单纯依赖人工治疗的强度不足, 往往直接限制了早期康复的效率和神经重塑的上限[8]。

#### 4.2. 减重支持系统(BWSTT)的核心作用与局限

偏瘫患者在发病早期往往因下肢支撑力弱、躯干控制差或平衡受损而无法安全站立。BWSTT 通过悬

吊装置动态卸载患者一部分体重, 使其在未完全具备抗重力支撑能力前, 即可尽早安全地进入直立步行训练阶段[9]。在减重环境下, 患者无需为了防跌倒而过度动用代偿机制。这有效减少了“画圈步态”、“骨盆代偿上提”等典型偏瘫异常步态的固化, 让患侧下肢能够更轻松地完成髋、膝、踝关节的屈伸交替。结合活动平板, BWSTT 能够在连续的步行周期中, 为足底和下肢关节提供动态的地面反作用力。这种接近正常行走的对称性本体感觉输入, 是唤醒神经肌肉控制、重建步态节律的重要基础。目前, 主流的系统评价和荟萃分析对 BWSTT 改善特定步态参数给予了中至高等级(Moderate to High)的证据支持, 但在某些维度的证据等级仍被评为低级别。改善步行速度与耐力(中/高等级证据) [10]。改善下肢运动功能与平衡(中等证据): 2024 年和 2025 年的最新荟萃分析指出, BWSTT 能有效提升 Fugl-Meyer 下肢运动功能评分和 Berg 平衡量表(BBS)评分。研究表明, 在发病 3~6 个月内进行干预, 且减重比例设定在最大体重的 30%以上时, 其促进神经重塑和运动功能恢复的收益最大。提高“独立步行转化率”(低等级证据): 针对完全依赖轮椅或无法独立行走的严重偏瘫患者, BWSTT 是否能比常规训练更高概率地让他们恢复“完全独立步行”能力, 目前的 Cochrane 系统评价及相关证据等级依然被评定为“低(Low certainty)”, 表明其在突破核心功能瓶颈上的绝对优势尚不明确[11]。尽管机制上具有优势, 但在实际物理治疗场景中, 传统的非机器人辅助 BWSTT 存在明显的局限, 如果仅依靠悬吊系统而不结合下肢外骨骼机器人, 通常需要至少 2~3 名治疗师同时操作(一人控制躯干骨盆, 一至两人在下方手动辅助患肢完成屈髋、伸膝和足廓清)。这种极度消耗体力的操作导致单次治疗时间受限, 难以真正在临床上普及[12]。减重吊带在提供支撑的同时, 不可避免地会限制骨盆的自然运动(如骨盆的侧倾、旋转)。如果吊带拉力方向或力度调节不当, 极易导致患者出现代偿性的非生理性步态; 此外, 跑步机恒定后退的履带是被动带动下肢, 与地面真实行走的肌肉主动发力模式(尤其是蹬伸阶段的足底推力)存在本质差异。

### 4.3. 下肢康复机器人的核心作用与局限

下肢康复机器人(无论是外骨骼式还是末端牵引式)能够精准模拟健康人的生理步态轨迹, 并提供“按需辅助(Assist-as-needed)”。最新临床数据证实, 机器人辅助步态训练(RAGT)能让患者在单次治疗中完成比传统人工训练多达 3 倍以上的标准化步数, 完美契合了神经重塑对“海量重复”的严苛要求[13]。人类的节律性步行在很大程度上由脊髓内的中枢模式发生器(CPG)网络驱动。康复机器人通过机械结构强制患肢执行极其规律的迈步动作, 这种源源不断、高度一致的生理性感觉输入(如髋关节规律性后伸、足底交替负重), 能够有效穿透受损的上位神经传导, 直接在脊髓层面刺激并激活 CPG, 从而显著提高患者最终恢复独立步行的几率。现代康复机器人能够提供高密度的感觉运动反馈, 促使大脑感觉运动皮层重新活跃。结合最新的康复理念, 机器人训练已被证明能更有效地提升脑卒中患者的步行耐力(如 6 分钟步行测试成绩), 并在宏观上加速中枢神经系统相关神经网络的修复与代偿[14]。在改善步行速度与耐力方面具有高等级证据, 多项大样本荟萃分析一致表明, 与单纯的常规物理治疗相比, RAGT(特别是结合常规康复时)在提高脑卒中患者的步速(如 10 米步行测试)和步行距离(如 6 分钟步行测试)上具有显著优势。这种提升在亚急性期(发病后 1~6 个月)患者中尤为明显[15]。在提升运动功能与动态平衡具有中/高等级证据, 机器人系统能够提供标准化、高频率、高强度的生理步态模拟。近期的系统评价证实, RAGT 能有效改善下肢 Fugl-Meyer 评分(FMA-LE)和 Berg 平衡量表(BBS)评分, 其促进中枢神经重塑的效果优于同等时间的传统人工训练[16]。尽管 RAGT 在提供“海量重复”方面具有无可比拟的优势, 但其技术与临床落地仍面临显著局限, 当机器人提供过多的机械辅助(尤其是采用固定轨迹的 100%辅助模式时), 患者的中枢神经系统会很快产生“依赖性”或“偷懒”现象。如果患者在训练中缺乏主动的运动意图和认知参与, 其引发的大脑感觉运动皮层重组效率将大幅下降。绝大多数下肢外骨骼机器人在设计上限制了髋、膝、踝关节的非矢状面运动(如骨盆的侧倾与旋转、踝关节的内外翻), 导致模拟出的步态轨迹极其僵硬。这种

非生理性的束缚不利于患者应对现实生活中复杂路面(如转向、跨越障碍)所需的动态平衡控制。

#### 4.4. 靶向腰骨盆复合体的核心干预与 ESWT 疗法与局限

传统的步态康复常忽视人体运动链的核心枢纽——腰骨盆复合体。下背部肌群的功能受损及高张力,是导致骨盆死锁、重构偏瘫代偿步态的根本原因[17]。气压弹道式体外冲击波(ESWT)的高能声波脉冲能产生强烈的空化效应与机械剪切力,通过“闸门控制理论”降低运动神经元的兴奋性[18][19]。靶向干预偏瘫侧下背部,不仅能迅速降低肌肉机械僵硬,更能从源头上“解锁”骨盆的三维活动度[20]。最新的一项前瞻性观察研究和 Meta 分析均证实,将 ESWT 与常规物理治疗相结合,不仅能显著降低痉挛评分,还能有效改善偏瘫患者在三维步态分析中的步长、步频以及下肢各关节的屈伸活动度,从生物力学层面优化了步态参数[21][22]。在躯干控制与平衡方面,核心训练具有高等级证据,多项最新的系统评价(伞形评价)证实,在常规物理治疗基础上增加靶向腰骨盆的稳定化训练(如动态神经肌肉稳定技术 DNS、核心肌群强化等),能显著提升躯干损伤量表(TIS)得分和 Berg 平衡量表(BBS)得分。这种改善在脑卒中发病后的急性期和亚急性期尤为显著[23][24]。步态时空参数方面为中等证据,核心训练纠正骨盆的异常前倾或侧倾,被证实能够有效增加患侧下肢在支撑期的负重时间,并改善步长和步宽的对称性。但 ESWT 具有局限性在于其降低痉挛的即刻效应非常显著,但其孤立疗效通常在治疗停止后的 4 到 12 周内逐渐减弱。它必须作为一种“机会窗口(Window of opportunity)”辅助手段,紧接着进行高强度的运动功能训练才能维持神经可塑性改变[25]。

#### 4.5. 功能性电刺激(FES)的作用与局限

功能性电刺激通过在特定的受损神经支配区或肌肉(如控制踝关节的腓神经和胫前肌)施加低频脉冲电流,精确模拟中枢神经系统的生理性运动指令,诱发瘫痪或无力肌肉产生节律性收缩。在步态康复中,FES 最核心的功能是精准纠正偏瘫患者典型的“足下垂”与“足内翻”。它能够在步行周期的摆动期提供即时的机械辅助,帮助患者完成踝关节背屈以避免足尖拖地;同时,电刺激带来的强烈本体感觉和肌肉收缩信号会沿着外周传入神经逆向输入中枢,帮助重建受损的感觉-运动皮层闭环反馈。2023 年的一项临床研究表明,将 FES 结合到跑步机步态训练中,相比于单纯的跑步机训练,能更显著地改善偏瘫患者的平衡能力、健侧肢体协调性以及步行耐力[26]。在改善动态平衡与躯干控制中,具有中/高等级证据,尽管机制上具备神经调节潜力,传统 FES 在实际物理康复应用中面临以下固有的局限,比如非生理性的快速肌肉疲劳(Muscle Fatigue),FES 诱发的肌肉收缩机制与人类自然生理性的运动单位募集顺序(Henneman 尺寸原理)正好相反。它往往优先激活表层、易疲劳的粗大神经纤维(快肌纤维),导致在持续的步行训练中,受刺激肌肉(如胫前肌)会极其迅速地产生疲劳。这极大地限制了单次步态训练的时间和步数剂量[27][28]。

#### 4.6. 虚拟现实技术(VR)的作用与局限

虚拟现实技术(VR)通过多通道感官反馈(视觉、听觉甚至触觉),为患者打造了一个生态效度极高、安全且高度互动的定制化训练环境。在功能应用层面,全沉浸式 VR 能够突破传统康复室的场景限制,设置如跨越虚拟障碍物、通过人行横道等“认知-运动”双重任务(Dual-task)。这种训练不仅能强烈激发大脑皮层镜像神经元系统的活跃,还能促使异常的同侧大脑皮层代偿向对侧正常感觉运动皮层的网络重组转化;此外,游戏化的目标导向机制极大缓解了步态重复训练的枯燥感。发表于 2024 年的最新系统评价证实,长周期的 VR 疗法比传统疗法更能显著改善慢性期脑卒中患者的平衡量表评分与起立-行走测试(TUG)表现,且具备极高的治疗依从性[29]。根据以 Cochrane 评价为代表的高质量循证医学文献,VR 在

脑卒中偏瘫步态康复中的证据等级整体呈现低至中等质量。其主要局限性在于使用头戴式显示器(HMD)的全沉浸式VR时,视觉输入与前庭觉/本体感觉之间的冲突容易导致患者出现眩晕、恶心、头痛等症状,部分高动态、高认知负荷的VR场景可能导致患者信息过载,不仅无法达到运动重塑的目的,反而会引起抗拒情绪。高精度的沉浸式VR系统以及与其适配的减重步态训练设备(如VR跑步机)成本高昂,且需要治疗师具备额外的软硬件操作与故障排查能力,难以在基层医院或家庭康复中大规模普及。

#### 4.7. 脑机接口技术(BCI)的作用与局限

脑机接口(BCI)代表了目前神经康复领域最前沿的“自上而下”神经重塑理念。该技术主要通过无创脑电图(EEG)实时采集并破译患者在进行“运动想象(Motor Imagery)”时大脑皮层产生的感觉运动节律(SMR)信号[30]。其核心功能在于:当系统解码出患者试图迈步的微弱运动意图后,会瞬间转化为控制指令,直接驱动外周的下肢外骨骼机器人或FES设备执行相应的步态动作。最新的系统评价表明,BCI能够直接解码大脑皮层的运动意图并驱动外周设备,在无形的大脑“意图”与外周的物理“动作”之间建立了毫秒级的精准闭环。这种高度同步的刺激完美契合了赫布学习法则(Hebbian theory),可有效诱发深层神经可塑性,从而突破严重偏瘫患者缺乏主动运动的康复瓶颈,有效提升患者的下肢运动功能及日常活动能力[31]。根据以Cochrane评价为代表的高质量循证医学文献,目前的整体证据等级处于低至中等质量(Low to Moderate Quality)。在向临床大规模转化和整合进常规步态分析与康复流程时,BCI暴露出显著的局限性:“BCI盲区”现象(BCI Illiteracy),约有10%至30%的脑卒中患者无法产生足够清晰、可被系统识别的脑电特征(如事件相关去同步化ERD,或运动相关皮层电位MRCP)[32]。这使得部分患者完全无法触发系统,导致治疗无效。头皮EEG信号极为微弱(微伏级别),极易受到环境噪声、面部肌电信号(EMG)的干扰。更致命的是,真正的“步态训练”包含大量的头颈部晃动和足地冲击,这些运动伪影(Movement artifacts)会严重淹没真实的脑电信号,导致目前绝大多数下肢BCI训练只能在患者静坐、平躺或悬吊减重的静态状态下进行。

### 5. 总结与展望

脑卒中后偏瘫步态是一个涉及多关节、多维度代偿的复杂生物力学问题,其本质在于肌肉无力与痉挛交织所引发的时空、运动学及动力学异常。精准量化这些异常特征是制定康复策略的前提,而三维步态分析与穿戴式传感器等技术正不断提升评估的客观性与多场景适用性。在干预策略方面,步态康复已逐渐从单一依赖手法、强度受限的传统物理疗法,向高频次、任务导向及神经调控技术辅助的系统性工程转型。虽然减重支持系统(BWSTT)、下肢康复机器人、体外冲击波(ESWT)以及功能性电刺激(FES)在提供大量标准化重复训练、靶向解锁骨盆及纠正特定异常(如足下垂)上展现出显著优势,但它们在真实临床中仍面临非生理性步态束缚、易引发肌肉疲劳或疗效维持时间短等局限。虚拟现实(VR)和脑机接口(BCI)作为前沿手段,进一步为激发深层皮层重组、建立毫秒级“中枢-外周”感觉运动闭环提供了具有突破性的干预路径。尽管新兴的神经辅助技术展现出巨大的临床潜力,但其整体循证医学证据多集中于低至中等质量,且存在应用门槛与技术痛点。未来脑卒中偏瘫步态康复的研究与转化应聚焦于以下几个关键方向:多模态融合的联合干预机制。单一技术往往难以覆盖步态康复在不同阶段的全方位需求,未来的康复范式应探索“自上而下”的中枢皮层刺激(如VR环境下的认知双重任务、BCI意图解码)与“自下而上”的外周物理纠正(如ESWT靶向降张力、外骨骼机器人按需辅助)的深度融合,以期最大化触发与维持神经可塑性效应。面对患者巨大的个体异质性(如部分患者存在高达30%的“BCI盲区”),临床干预不能一概而论,需依托高精度的评估技术,动态调整设备的干预参数,避免机器人等辅助设备提供过度辅助而导致患者中枢神经系统产生“依赖性”和代偿固化。亟需通过算法迭代,攻克BCI在真实自然步行

中极易受到足地冲击与头颈晃动所产生的运动伪影干扰难题, 打破其只能在静态下训练的瓶颈。同时, 推动沉浸式 VR 和穿戴式传感器等设备降低成本并提升操作简易度, 使其能更好地服务于基层医院及真实生活环境下的长周期家庭康复。针对目前多数前沿技术证据等级偏低、存在“天花板效应”或“实验室效应”的现状, 学界亟需开展多中心、大样本的高质量随机对照试验。未来的研究应致力于明确各类软硬件技术介入的最佳时间窗口期、标准化治疗剂量及长期功能转化率, 从而为偏瘫步态康复提供更加坚实的循证医学支撑。

## 参考文献

- [1] Chen, B., Yang, T., Liao, Z., Sun, F., Mei, Z. and Zhang, W. (2025) Pathophysiology and Management Strategies for Post-Stroke Spasticity: An Update Review. *International Journal of Molecular Sciences*, **26**, Article No. 406. <https://doi.org/10.3390/ijms26010406>
- [2] 杨玉珊, 郑洁皎, 章丽莉. 脑卒中患者的偏瘫步态研究进展[J]. 中医康复, 2024, 1(9): 1-5.
- [3] Li, S., Francisco, G.E. and Zhou, P. (2018) Post-Stroke Hemiplegic Gait: New Perspective and Insights. *Frontiers in Physiology*, **9**, Article No. 1021. <https://doi.org/10.3389/fphys.2018.01021>
- [4] Stanhope, V.A., Knarr, B.A., Reisman, D.S. and Higginson, J.S. (2014) Frontal Plane Compensatory Strategies Associated with Self-Selected Walking Speed in Individuals Post-Stroke. *Clinical Biomechanics*, **29**, 518-522. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2014.03.013>
- [5] Chen, Z., Li, M., Cui, H., Wu, X., Chen, F. and Li, W. (2022) Effects of Kinesio Taping Therapy on Gait and Surface Electromyography in Stroke Patients with Hemiplegia. *Frontiers in Physiology*, **13**, Article ID: 1040278. <https://doi.org/10.3389/fphys.2022.1040278>
- [6] Bonomi, A.G., Goris, A.H.C., Yin, B. and Westerterp, K.R. (2009) Detection of Type, Duration, and Intensity of Physical Activity Using an Accelerometer. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, **41**, 1770-1777. <https://doi.org/10.1249/mss.0b013e3181a24536>
- [7] Kim, S., Lee, Y. and Kim, K. (2025) Gait Training with Virtual Reality-Based Real-Time Feedback for Chronic Post-Stroke Patients: A Pilot Study. *Healthcare*, **13**, Article No. 203. <https://doi.org/10.3390/healthcare13020203>
- [8] Park, Y., Lee, D. and Lee, J. (2024) A Comprehensive Review: Robot-Assisted Treatments for Gait Rehabilitation in Stroke Patients. *Medicina*, **60**, Article No. 620. <https://doi.org/10.3390/medicina60040620>
- [9] Koldaş Doğan, Ş. (2024) Robot-Assisted Gait Training in Stroke. *Turkish Journal of Physical Medicine and Rehabilitation*, **70**, 293-299. <https://doi.org/10.5606/tftrd.2024.15681>
- [10] Jiang, Z., Zhang, X., Fu, Q. and Tao, Y. (2024) Effects of Body Weight Support Training on Balance and Walking Function in Stroke Patients: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Frontiers in Neurology*, **15**, Article ID: 1413577. <https://doi.org/10.3389/fneur.2024.1413577>
- [11] Shi, Y., Liu, J. and Zhang, X. (2025) Optimal Training Strategy for Body Weight Support Treadmill Training to Enhance Lower Limb Motor Function and Activity of Daily Living in Persons with Stroke: A Systematic Review and Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials. *Frontiers in Neurology*, **16**, Article ID: 1649246. <https://doi.org/10.3389/fneur.2025.1649246>
- [12] Westlake, K.P. and Patten, C. (2009) Pilot Study of Lokomat versus Manual-Assisted Treadmill Training for Locomotor Recovery Post-Stroke. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, **6**, Article No. 18. <https://doi.org/10.1186/1743-0003-6-18>
- [13] Pichardo, A. and Malovec, M. (2025) Enhancing Post-Stroke Gait Rehabilitation with Robot-Assisted Therapy: A Focus on Step Repetitions and Neuroplasticity. *Archives of Clinical and Biomedical Research*, **9**, 212-219. <https://doi.org/10.26502/acbr.50170453>
- [14] Wang, J., Zhang, H., Ma, J., Gu, L. and Li, X. (2025) Efficacy of Combined Non-Invasive Brain Stimulation and Robot-Assisted Gait Training on Lower Extremity Recovery Post-Stroke: A Systematic Review and Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials. *Frontiers in Neurology*, **16**, Article ID: 1500020. <https://doi.org/10.3389/fneur.2025.1500020>
- [15] Bruni, M.F., Melegari, C., De Cola, M.C., Bramanti, A., Bramanti, P. and Calabrò, R.S. (2018) What Does Best Evidence Tell Us about Robotic Gait Rehabilitation in Stroke Patients: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Journal of Clinical Neuroscience*, **48**, 11-17. <https://doi.org/10.1016/j.jocn.2017.10.048>
- [16] Lee, J.H. and Kim, G. (2025) Effectiveness of Robot-Assisted Gait Training in Stroke Rehabilitation: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Journal of Clinical Medicine*, **14**, Article No. 4809. <https://doi.org/10.3390/jcm14134809>
- [17] Van Criekinge, T., Saeys, W., Hallemsans, A., Velghe, S., Viskens, P., Vereeck, L., et al. (2017) Trunk Biomechanics

- during Hemiplegic Gait after Stroke: A Systematic Review. *Gait & Posture*, **54**, 133-143. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2017.03.004>
- [18] Liu, W. and Zhang, S. (2025) Extracorporeal Shock Wave Therapy for Limb Dysfunction after Stroke. *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*, **104**, 654-662. <https://doi.org/10.1097/phm.0000000000002694>
- [19] Fan, T., Zhou, X., He, P., Zhan, X., Zheng, P., Chen, R., *et al.* (2021) Effects of Radial Extracorporeal Shock Wave Therapy on Flexor Spasticity of the Upper Limb in Post-Stroke Patients: Study Protocol for a Randomized Controlled Trial. *Frontiers in Neurology*, **12**, Article ID: 712512. <https://doi.org/10.3389/fneur.2021.712512>
- [20] Yang, E., Lew, H.L., Özçakar, L. and Wu, C. (2021) Recent Advances in the Treatment of Spasticity: Extracorporeal Shock Wave Therapy. *Journal of Clinical Medicine*, **10**, Article No. 4723. <https://doi.org/10.3390/jcm10204723>
- [21] Cabanas-Valdés, R., Calvo-Sanz, J., Urrütia, G., Serra-Llobet, P., Pérez-Bellmunt, A. and Germán-Romero, A. (2019) The Effectiveness of Extracorporeal Shock Wave Therapy to Reduce Lower Limb Spasticity in Stroke Patients: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Topics in Stroke Rehabilitation*, **27**, 137-157. <https://doi.org/10.1080/10749357.2019.1654242>
- [22] Afzal, B., Noor, R., Mumtaz, N. and Bashir, M.S. (2023) Effects of Extracorporeal Shock Wave Therapy on Spasticity, Walking and Quality of Life in Poststroke Lower Limb Spasticity: A Systematic Review and Meta-Analysis. *International Journal of Neuroscience*, **134**, 1503-1517. <https://doi.org/10.1080/00207454.2023.2271164>
- [23] Du, M., Chen, L., Li, Y., Xia, L., Liu, Y., Guo, M., *et al.* (2025) Effect of Exercise-Based Interventions on Stroke Rehabilitation: An Umbrella Review of Systematic Reviews and Meta-Analyses. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, **22**, Article No. 240. <https://doi.org/10.1186/s12984-025-01781-y>
- [24] Pelin Kaymaz, E., Geler Külcü, D. and Mesci, N. (2024) Effects of Trunk Stabilization Exercises on Balance, Functionality and Abdominal Muscle Thickness in Hemiplegic Patients. *Turkish Journal of Physical Medicine and Rehabilitation*, **70**, 61-72. <https://doi.org/10.5606/tftrd.2024.13209>
- [25] Manganotti, P. and Amelio, E. (2005) Long-Term Effect of Shock Wave Therapy on Upper Limb Hypertonia in Patients Affected by Stroke. *Stroke*, **36**, 1967-1971. <https://doi.org/10.1161/01.str.0000177880.06663.5c>
- [26] Dantas, M.T.A.P., Fernani, D.C.G.L., Silva, T.D.d., Assis, I.S.A.d., Carvalho, A.C.d., Silva, S.B., *et al.* (2023) Gait Training with Functional Electrical Stimulation Improves Mobility in People Post-Stroke. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **20**, Article No. 5728. <https://doi.org/10.3390/ijerph20095728>
- [27] Bickel, C.S., Gregory, C.M. and Dean, J.C. (2011) Motor Unit Recruitment during Neuromuscular Electrical Stimulation: A Critical Appraisal. *European Journal of Applied Physiology*, **111**, 2399-2407. <https://doi.org/10.1007/s00421-011-2128-4>
- [28] Zhang, B., Fang, C. and Su, Y. (2026) Efficacy of Functional Electrical Stimulation at Different Frequencies for Post-Stroke Foot Drop: A Retrospective Cohort Study. *Frontiers in Neurology*, **17**, Article ID: 1766337. <https://doi.org/10.3389/fneur.2026.1766337>
- [29] Zimmerli, L., Jacky, M., Lünenburger, L., Riener, R. and Bolliger, M. (2013) Increasing Patient Engagement during Virtual Reality-Based Motor Rehabilitation. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, **94**, 1737-1746. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2013.01.029>
- [30] Wang, H., Shen, H., Han, Y., Zhou, W. and Wang, J. (2025) Effect of Robot-Assisted Training for Lower Limb Rehabilitation on Lower Limb Function in Stroke Patients: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Frontiers in Human Neuroscience*, **19**, Article ID: 1549379. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2025.1549379>
- [31] Guo, X., Li, P., Liu, H. and Ding, S. (2026) A Systematic Review of the Effects of Brain-Computer Interface on Lower Limb Motor Function, Balance Function, and Activities of Daily Living in Stroke Patients. *Frontiers in Neuroscience*, **19**, Article ID: 1641843. <https://doi.org/10.3389/fnins.2025.1641843>
- [32] Vidaurre, C. and Blankertz, B. (2010) Towards a Cure for BCI Illiteracy. *Brain Topography*, **23**, 194-198. <https://doi.org/10.1007/s10548-009-0121-6>