

·临床研究·

下肢机器人结合本体感觉神经肌肉促进技术 对脑卒中患者下肢功能的临床疗效研究*

吴雪娇¹ 朱玉连² 丁小琴¹ 彭广卫¹ 沈小花¹ 荣积峰^{1,3}

摘要

目的:研究下肢机器人结合本体感觉神经肌肉促进技术(PNF)针对脑卒中偏瘫患者下肢功能的临床疗效。

方法:68例脑卒中偏瘫患者,随机分为常规组(A组,进行常规康复训练)23例,PNF组(B组,在常规康复治疗的基础上结合PNF技术治疗)22例,下肢机器人结合PNF技术组(C组,在B组治疗的基础上,配合下肢机器人训练)23例,共治疗4周。治疗前、治疗2周后、治疗4周后分别采用Berg量表评估平衡能力(BBS),功能性步行量表(FAC)评价患者步行能力,Fugl-Meyer下肢运动功能量表(FMA-L)和10m最大步行速度测试(MWS)评估下肢运动功能和步行速度。

结果:治疗2周后,C组在FMA-L、FAC和MWS方面显著优于A组($P < 0.01$)和B组($P < 0.05$)。治疗4周后,C组在FMA-L、BBS、FAC和MWS方面显著优于A组($P < 0.05$)和B组($P < 0.05$),B组在FMA-L、BBS、MWS方面优于A组($P < 0.05$);组内比较治疗4周后与治疗前均具有显著性差异($P < 0.05$)。

结论:下肢机器人结合PNF技术对改善脑卒中偏瘫患者下肢功能的疗效显著,有助于提高患者的步行能力和平衡功能。

关键词 下肢康复机器人;本体感觉神经肌肉促进技术;脑卒中;偏瘫;步行;运动功能

中图分类号:R743.3,R493 文献标识码:A 文章编号:1001-1242(2020)-08-0938-06

The therapeutic effect of lower limb robot combined with PNF technique on lower limb function in stroke patients/WU Xuejiao, ZHU Yulian, DING Xiaoqin, et al./Chinese Journal of Rehabilitation Medicine, 2020, 35(8): 938—943

Abstract

Objective: To study the therapeutic effect of lower limb robot combined with proprioceptive neuromuscular facilitation (PNF) on lower extremity function in stroke patients with hemiplegia.

Method: Sixty-eight patients with stroke hemiplegia were randomly divided into the conventional group (group A, routine rehabilitation training, $n=23$), and the PNF group (group B, combined with conventional rehabilitation therapy based on PNF technology, $n=22$), and the lower limb robot combined with PNF technique (group C, based on the treatment of group B, combined with lower limb robot training, $n=23$). All patients were treated for 4 weeks. Before the treatment, after 2 weeks of treatment, and after 4 weeks of treatment, the Berg balance scale (BBS) and the Functional ambulation category scale (FAC) were used to evaluate the patients' walking ability. The Fugl-Meyer assessment lower extremity scale (FMA-L) and the 10m maximum walking speed (MWS) were used to assess the patients' lower extremity motor function and walking speed.

Result: After 2 weeks of treatment, group C was significantly better than group A ($P < 0.01$) and group B ($P < 0.05$) in FMA-L, FAC and MWS. After 4 weeks of treatment, group C was significantly better than group A

DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2020.08.010

*基金项目:上海市科学技术委员会科研计划项目(15441901702)

1 上海市第一康复医院康复治疗中心,上海市,200090; 2 复旦大学附属华山医院康复医学科; 3 通讯作者

第一作者简介:吴雪娇,女,硕士,初级治疗师; 收稿日期:2019-12-14

($P<0.05$) and group B ($P<0.05$) in FMA-L, BBS, FAC and MWS. Group B was significantly better than group A ($P<0.05$) in FMA-L, BBS and MWS; There was significant difference between the groups after 4 weeks of treatment and before treatment ($P<0.05$).

Conclusion: Lower extremity robot combined with PNF technique had a significant effect on improving lower limb function in stroke patients with hemiplegia, which helped to improve the walking ability and balance function of patients.

Author's address The First Rehabilitation Hospital of Shanghai, Shanghai, 200090

Key word lower limb rehabilitation robot; proprioceptive neuromuscular facilitation; stroke; hemiplegia; walking; motor function

随着人口老龄化的加剧,脑卒中患者数量的增加会导致越来越多的医疗卫生问题^[1]。脑卒中极易导致患者运动功能障碍、步行障碍,近3/4的脑卒中发生在年龄大于65岁的人群中,且发病年龄逐年呈现年轻化趋势^[2]。研究报道,脑卒中后3个月,约1/4的患者仍需坐轮椅。60%的患者步行速度减慢,极大影响患者的日常生活。异常的姿势控制能力以及平衡功能障碍使患者跌倒风险增加^[3]。因此,脑卒中患者下肢功能的提高是康复治疗的重要目标。

随机对照试验和系统评价表明,下肢外骨骼康复机器人训练对脑卒中患者步行、活动能力和平衡等方面具有一定的临床治疗作用^[4]。本体感觉神经肌肉促进技术(proprioceptive neuromuscular facilitation, PNF)在本体感觉的刺激、关节活动度的改善等方面具有积极的疗效,本研究旨在探讨下肢康复机器人结合PNF技术对脑卒中偏瘫患者下肢运动功能和平衡功能的影响,为脑卒中偏瘫患者的康复治疗提供参考。

1 资料与方法

1.1 一般资料

选取2017年6月—2019年3月在上海市第一康复医院康复治疗中心和复旦大学附属华山医院康复医学科治疗的脑卒中偏瘫患者68例。

纳入标准:①脑卒中后偏瘫患者,符合1995年中华医学会第四次全国脑血管病学术会议修订的

《各类脑血管疾病诊断要点》,均具有头颅CT或MRI的影像学诊断依据;②首次患脑卒中,病程1—4个月;③能够理解和进行简单沟通,简易精神状态量表(MMSE)评分 ≥ 22 分者;④在1人辅助下,可站立并至少可在帮助下步行10m以上;⑤下肢肌张力的改良Ashworth痉挛评定评分 $\leq 1^+$ 级;⑥患者和家属知情同意,并自愿参加本研究。

排除标准:①合并严重心脏或肺部疾病不能参加运动者;②严重的关节炎或伴有其他严重肌肉骨骼系统疾病者;③剧烈疼痛者;④严重下肢感觉功能障碍及前庭功能障碍者;⑤伴有脑肿瘤等颅内占位性病变、脑外伤、脑寄生虫病、代谢障碍等;⑥存在严重精神状态异常,无法配合完成治疗,或依从性差的患者;⑦生命体征不稳定者。

用随机数字法将入选患者随机分为常规组(A组)、PNF组(B组)和下肢机器人训练结合PNF技术组(C组),A组接受常规康复治疗;B组采用本体感觉神经肌肉促进技术(PNF)治疗;C组采用下肢机器人训练同时配合PNF康复技术治疗。三组患者年龄、性别、脑卒中类型、病程等均无显著性差异($P>0.05$),见表1。

1.2 治疗方法

所有患者接受康复治疗的总时间相同,均接受常规治疗包括物理治疗、作业治疗、言语治疗和药物治疗等。在康复训练之前,采用ICF模式对患者的身体结构和功能、活动、参与、个人因素及环境因素

表1 三组患者一般资料比较

组别	例数	性别(例)		年龄 ($\bar{x}\pm s$,岁)	脑卒中类型(例)		病程 ($\bar{x}\pm s$,天)	偏瘫侧(例)	
		男	女		脑梗死	脑出血		左侧	右侧
A组	23	15	8	56.12 $\pm$ 9.10	12	11	84.12 $\pm$ 7.56	14	9
B组	22	14	8	53.45 $\pm$ 8.32	13	9	82.60 $\pm$ 4.17	12	10
C组	23	14	9	55.67 $\pm$ 5.02	12	11	82.32 $\pm$ 9.06	13	10

注:A组:常规组;B组:PNF治疗组;C组:下肢机器人结合PNF技术治疗组。

进行评价,确定患者的治疗目标,并制定康复治疗计划。

1.2.1 常规组:A组常规的康复训练包括Bobath技术、Brunnstrom技术、运动再学习法等神经发育促进技术,以及运动疗法、坐站平衡训练、步态训练、日常生活活动能力训练等,60min/天,每周5天,共4周。

1.2.2 PNF治疗组:B组在常规康复训练的基础上结合PNF技术。PNF技术包括患侧下肢PNF技术训练、垫上活动技术、步态训练技术等,下肢PNF技术主要为屈曲—外展—内旋模式(flexion-abduction-internal rotation),分为膝关节屈曲和伸展2种模式,60min/天,每周5天,共4周。

PNF屈曲—外展—内旋伴膝关节屈手法训练:患者仰卧位,患侧下肢呈伸展—内收—外旋模式伴膝关节伸展,治疗师远端的手抓握患者足背,手指在外侧缘,拇指在内侧缘施加压力;近端手放在患者大腿的前—外侧接近膝关节处,手指在上,拇指在外侧;令患者完成足趾伸、踝背屈外翻、膝关节屈曲、髌关节屈曲外展内旋的运动。PNF屈曲—外展—内旋伴膝关节伸手法训练:患者仰卧位,患侧下肢呈伸展—内收—外旋模式伴膝关节屈曲(小腿垂于床缘),治疗师远端的手抓握患者足背,手指在外侧缘,拇指在内侧缘施加压力;近端手放在患者大腿的前—外侧接近膝关节处,手指在上,拇指在外侧;令患者完成足趾伸、踝背屈外翻运动,接着髌关节运动,当屈髌 $>5^{\circ}$ 时,膝关节开始伸,注意膝关节伸展、髌关节屈曲外展内旋模式的运动应同时达到它们运动的终末范围;PNF垫上活动技术包括翻身、肘支撑(前臂支撑)俯卧位、侧坐、四足跪、跪、半跪、从手—足立位至站立位,再回到手—足立位、坐位训练、桥式运动等。PNF步态训练技术主要包括坐位的准备阶段、站起和坐下、站立、步行及其他活动。步态训练中用反复牵拉反射诱发髂腰肌收缩,进而促进屈髌动作的完成。在患侧下肢摆动相过程,针对不同患者的足下垂和内翻,施以差异化的牵拉反射诱发踝背屈及外翻。

1.2.3 下肢机器人结合PNF技术治疗组:C组在B组治疗的基础上,配合下肢机器人训练,采用Lokomat全自动机器人步态训练系统进行步态训练,训练总时间每天60min,每周5次,共4周。

Lokomat下肢外骨骼康复机器人(瑞士Hocoma公司,Lokocontrol v5.04)是一种计算机控制的步态康复系统,由一对外骨骼机器人结构组成,助力患者下肢运动。Lokomat髌关节和膝关节由位于外骨骼结构内的线性力操纵,使大腿和小腿在矢状面随着步态周期进行运动,踝背屈则通过具有弹性的弹力脚蹬协助获得^[5]。Lokomat下肢机器人训练前由专业人员测量患者大腿和小腿长度、粗细,根据每个患者的体型差异对下肢机器人装置进行个体化调节。下肢机器人系统通过绑带悬吊患者躯干,从而减少下肢及腰部所承受的负荷,训练时根据患者的功能水平调节减重程度,刚开始训练时减重的量一般为患者体重的40%,并逐渐减至0。另外,调节步速范围于1.0—2.0km/h,每级增加0.2—0.4km/h,训练过程中,引导力从开始时的100%逐渐减至10%。训练中根据患者功能的恢复情况对减重范围、步态及速度进行调整,注意不要因为速度太快而使患者无法完成训练。

1.3 评定指标

治疗前、治疗2周后、治疗4周后均由同一名不知分组情况的康复治疗师对患者进行临床评估,评价方法包括:

Fugl-Meyer下肢运动功能量表评分(Fugl-Meyer assessment lower extremity,FMA-L)评估患者下肢运动功能,共17项目,分值0—2分,总分34分^[6],分值越高反映下肢主动运动及分离运动功能越好。

Berg平衡量表(Berg balance scale,BBS)评价平衡能力,包括14个评分项目,对坐位及站立的静态平衡、动态平衡等进行全面评价,每个项目4分,总分为56分,最低分为0分^[7],得分越高则表明平衡功能越好。

10m最大步行速度测试(10m maximum walking speed,MWS)用于测试患者步行10m时的最大步行速度^[8],通过标记长度14m的走道,让患者以最快、最稳定的速度直线行走,选取中间10m的步行时间,测试3次,并取平均值(m/min),测试间隔患者可适当休息。

功能性步行量表(functional ambulation category scale,FAC)评价患者步行的能力,分为0—5级,等级越高,步行功能则越好^[9]。

1.4 统计学分析

数据采用 SPSS 20.0 统计软件进行分析,对数据进行正态分布和方差齐性检验,计量资料采用均数±标准差表示,组间和组内比较分别采用单因素方差分析和重复测量方差分析,分类资料通过 χ^2 检验,等级资料采用秩和检验, $P < 0.05$ 表示差异具有显著性意义。

2 结果

三组患者在治疗前各项临床评估指标均无显著性差异($P > 0.05$)。治疗2周后,C组在FMA-L、FAC和MWS方面显著优于A组($P < 0.01$)和B组($P < 0.05$)。治疗4周后,C组在FMA-L、BBS、FAC和MWS方面显著优于A组($P < 0.05$)和B组($P < 0.05$);B组在FMA-L、BBS和MWS方面显著优于A组($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$);组内比较治疗4周后与治疗前均具有显著性差异($P < 0.05$)。见表2—5。

3 讨论

脑卒中是世界范围内的常见疾病,研究报道,脑卒中偏瘫患者步行时跌倒发生率为14%—39%,而其中10%—25%的脑卒中患者跌倒后会出现严重不

表2 三组患者治疗前、治疗2周后、治疗4周后FMA-L评分比较 ($\bar{x} \pm s$, 分)

组别	例数	治疗前	治疗2周后	治疗4周后
A组	23	15.59±2.21	17.45±5.01	19.13±2.65 ^③
B组	22	15.37±4.58	18.97±4.60	23.62±2.15 ^{③④}
C组	23	16.03±4.03	22.56±2.18 ^{①②}	28.36±1.90 ^{③④⑤}

①与A组治疗2周后比较: $P < 0.01$;②与B组治疗2周后比较: $P < 0.05$;③同组治疗前与治疗4周后比较: $P < 0.05$;④与A组治疗4周后比较: $P < 0.05$;⑤与B组治疗4周后比较: $P < 0.05$

表3 三组患者治疗前、治疗2周后、治疗4周后BBS评分比较 ($\bar{x} \pm s$, 分)

组别	例数	治疗前	治疗2周后	治疗4周后
A组	23	19.86±1.05	22.38±4.93	26.25±4.13 ^③
B组	22	18.40±3.62	27.65±5.12 ^①	33.72±6.06 ^{③④}
C组	23	19.39±2.75	29.03±4.82 ^②	38.96±5.50 ^{③④⑤}

与A组治疗2周后比较:① $P < 0.05$;② $P < 0.01$;③同组治疗前与治疗4周后比较: $P < 0.05$;④与A组治疗4周后比较: $P < 0.01$;⑤与B组治疗4周后比较: $P < 0.05$

表4 三组患者治疗前、治疗2周后、治疗4周后MWS比较 ($\bar{x} \pm s$, m/min)

组别	例数	治疗前	治疗2周后	治疗4周后
A组	23	29.92±2.58	37.12±5.46	49.71±7.05 ^③
B组	22	30.54±2.69	40.69±6.60	60.03±5.14 ^{③④}
C组	23	29.89±4.01	49.91±5.25 ^{①②}	71.12±4.98 ^{③④⑤}

①与A组治疗2周后比较: $P < 0.01$;②与B组治疗2周后比较: $P < 0.05$;③同组治疗前与治疗4周后比较: $P < 0.05$;④与A组治疗4周后比较: $P < 0.05$;⑤与B组治疗4周后比较: $P < 0.01$

表5 三组患者治疗前、治疗2周后、治疗4周后FAC评分比较

组别	例数	治疗前						治疗2周后						治疗4周后					
		0	1	2	3	4	5	0	1	2	3	4	5	0	1	2	3	4	5
A组	23	0	10	11	1	1	0	0	8	10	5	0	0	0	2	11	9	1	0
B组	22	0	10	10	2	0	0	0	5	12	5	0	0	0	1	7	10	4	0
C组	23	0	11	10	2	0	0	0	5	6	7	5	0	0	1	2	8	9	3

治疗2周后:C组与A组之间比较: $P < 0.01$;C组与B组比较: $P < 0.05$;治疗4周后比较:A、B、C组内比较: $P < 0.05$;C组与A组比较: $P < 0.01$;C组与B组比较: $P < 0.05$

良后果,使患者产生恐惧心理,影响日常生活^[10]。通过积极的康复训练有利于患者重新获得一些功能性活动的的能力,并提高患者生活质量。

本研究结果发现,三组患者在FMA-L、BBS、FAC和MWS评分方面均比治疗前有明显改善,下肢机器人结合PNF技术组治疗效果显著优于常规组和PNF组。根据Kashi等^[11]研究报道,人机交互模式在各行业领域中的应用越来越普遍,康复机器人在医疗卫生领域中得到了迅速的发展。下肢康复机器人系统具有减重功能,能够模拟正常的步态模式,帮助调节患者站立相和摆动相的肌群功能状态^[12]。Chang等^[13]表明,机器人辅助治疗已被提升为脑卒

中康复治疗过程中的重要治疗方式,有助于改善脑卒中患者的运动功能,推荐作为与常规康复治疗相结合的辅助治疗方式。

PNF技术是基于运动学习和运动控制的一种整合治疗方法,采用了后效应、扩散、交互抑制等神经生理学原理,通过积极的直接或间接治疗方法,调动患者主观积极性并充分发掘患者的潜能,以帮助患者达到最高的功能水平。本研究结果显示,PNF组在FMA-L、BBS和MWS方面显著优于常规组。Seo等^[14]研究显示,PNF技术能有效地引发运动单位的最大响应,是脑卒中偏瘫患者独立步行以及平衡所必需的肌肉强化和再训练的有效疗法。Wang等^[15]

研究表明,PNF技术有助于改善脑卒中患者下肢肌肉异常增加的肌张力,对提高患者下肢功能具有积极效果。针对偏瘫患者存在的异常肌张力,本研究利用神经生理学的交互抑制原理,采用PNF技术里的收缩—放松、保持—放松技术,以降低患者的异常肌张力。本研究PNF组患者FMA-L、BBS和MWS评分均得到提高,进一步证实了PNF技术对下肢功能的促进作用。本研究中,PNF组与常规组的FAC评分没有显著性差异,可能是因为常规组患者通过Bobath技术、Brunnstrom技术等常规神经发育促进技术对下肢功能进行康复训练,对患者的功能性步行具有相似的积极影响。而且在治疗过程中康复训练以主动为主,患者当天的体能、心理和精神因素影响较大。因而PNF组与常规组的FAC评分未发现显著性差异。

肌肉力量、关节稳定性、灵活性及本体感觉等功能缺失,易导致脑卒中后步态、平衡等功能障碍。Chung等^[16]表明,下肢机器人辅助训练可以为脑卒中患者提供步行、活动能力和平衡方面的额外益处。本研究针对患者下肢功能的障碍,将下肢机器人技术与PNF技术结合为患者的康复提供了更加有效的康复治疗,主要机制可能在于:

①步行是人体下肢进行一系列的反复的运动行为,连续性、站立稳定性和能量节省性是正常步态的必备要素^[21]。患者在下肢机器人的辅助下,可进行长时间高质量的步行训练,通过高强度的运动重复,达到了改善治疗效果的目的^[18]。脑卒中后大脑恢复过程中,患者通过特定反复的学习,有助于储备正确的运动模式信号,从而促进脑功能的重组,改善脑卒中偏瘫患者的运动功能^[19]。通过PNF技术进行步态训练,可采用反复牵拉反射诱发髂腰肌收缩,进而促进患者屈髋动作的完成,且有助于提高患侧下肢各关节的稳定性。本研究结果表明,治疗4周后,PNF组的下肢运动功能表现优于常规组,且下肢机器人技术与PNF技术结合组效果最显著,充分表明将下肢机器人技术与PNF技术结合对脑卒中患者下肢功能的优势所在。

②PNF技术通过训练关节周围大肌群产生连带作用,从而使相应小肌群产生运动,PNF下肢屈曲—外展—内旋模式通过对腓骨长短肌、足背肌群等进

行刺激,可诱发并促进踝关节背屈、外翻运动。在患侧下肢摆动相过程,针对不同患者的足下垂和内翻,施以差异化的牵拉反射有助于诱发踝背屈及外翻。PNF技术中节律性稳定训练对改善脑卒中患者下肢各关节的稳定性和运动控制皆有较好的效果,有助于改善患侧下肢支撑相出现的膝过伸现象。通过增强肌群间协调能力,促使主动肌与拮抗肌的协调能力提高,对下肢平衡功能起到重要的作用^[20]。

③感觉输入、关节的持续运动等因素可以影响目标区域的皮质兴奋,促进脑的可塑性。本研究中,患者在进行下肢机器人训练时,有专业的治疗师对患者进行指导,并提示患者视觉参与,使患者得到重心转移、动态平衡功能的强化训练,提高患侧下肢负重能力,进而促进患者步行和平衡功能的改善。研究表明,患者平衡功能的改善有助于降低跌倒风险,步行能力的提高不仅可增加患者活动的空间范围,而且是患者独立生活的重要基本功能^[21]。通过PNF训练和下肢机器人训练过程中对患侧足底、下肢各关节肌梭、肌腱等本体感受器的反复刺激,强化肢体感觉的输入,并且调动患者主观积极性,有助于新的神经通路及运动模式的建立,从而改善患者运动功能,提升平衡能力。

④研究表明,康复机器人有助于改善传统康复治疗中“一对一”治疗模式的局限性,提高治疗师的工作效率,并改善患者康复进程^[22]。通过下肢机器人提供连续的步行训练,以及PNF技术对患者下肢的肌肉功能、运动能力改善,患者的下肢功能不断得到提高,进而得到步行速度的提升,提高步行功能。

4 结论

下肢机器人结合PNF技术能够有效改善脑卒中偏瘫患者的下肢功能,有助于提高患者的步行能力和平衡功能。另外,本研究尚存在不足之处,尚未针对PNF技术与下肢机器人技术进行对比研究;并且由于住院时间的限制,对患者的观察时间相对较短;PNF技术与下肢机器人的相关机制性作用有待进一步研究。

参考文献

- [1] Feigin VL, Forouzanfar MH, Krishnamurthi R, et al. Glob-

- al and regional burden of stroke during 1990-2010: findings from the Global Burden of Disease Study 2010[J]. *Lancet*, 2014, 383(9913):245—255.
- [2] Chen B, Ma H, Qin LY, et al. Recent developments and challenges of lower extremity exoskeletons[J]. *Journal of Orthopaedic Translation*, 2016, 5:26—37.
 - [3] 吴雪娇, 郑洁皎, 夏汶, 等. 脑卒中偏瘫患者坐一站转移生物力学分析研究进展[J]. *中国康复理论与实践*, 2018, 24(3): 290—295.
 - [4] Swinnen E, Beckwée D, Meeusen R, et al. Does robot-assisted gait rehabilitation improve balance in stroke patients? A systematic review[J]. *Topics in Stroke Rehabilitation*, 2014, 21(2):87—100.
 - [5] Domingo A, Lam T. Reliability and validity of using the Lokomat to assess lower limb joint position sense in people with incomplete spinal cord injury[J]. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 2014, 11(1):167.
 - [6] Louie DR, Lim SB, Eng JJ. The efficacy of lower extremity mirror therapy for improving balance, gait, and motor function poststroke: a systematic review and meta-analysis [J]. *Journal of Stroke and Cerebrovascular Diseases*, 2019, 28(1):107—120.
 - [7] Louie DR, Eng JJ. Berg balance scale score at admission can predict walking suitable for community ambulation at discharge from inpatient stroke rehabilitation[J]. *Journal of Rehabilitation Medicine*, 2018, 50(1):37—44.
 - [8] Cleland BT, Arshad H, Madhavan S. Concurrent validity of the gaitrite electronic walkway and the 10-m walk test for measurement of walking speed after stroke[J]. *Gait & Posture*, 2019, 68:458—460.
 - [9] Jeong KS, Jin LH, Won HS, et al. Clinical characteristics of proper robot-assisted gait training group in non-ambulatory subacute stroke patients[J]. *Annals of Rehabilitation Medicine*, 2016, 40(2):183—9.
 - [10] Yang S, Hwang WH, Tsai YC, et al. Improving balance skills in patients who had stroke through virtual reality treadmill training[J]. *Am J Phys Med Rehabil*, 2011, 90(12):969—978.
 - [11] Kashi S, Levy-Tzedek S. Smooth leader or sharp follower? Playing the mirror game with a robot[J]. *Restorative Neurology & Neuroscience*, 2017, 36(2):147—159.
 - [12] 赵明明, 陈昱, 黄艳群, 等. 下肢康复机器人对老年脑卒中患者平衡和协调功能的影响[J]. *中国老年保健医学*, 2018, 16(3):82—85.
 - [13] Chang WH, Kim YH. Robot-assisted therapy in stroke rehabilitation[J]. *J Stroke*, 2013, 15(3):174—181.
 - [14] Seo KC, Kim HA. The effects of ramp gait exercise with PNF on stroke patients' dynamic balance[J]. *J Phys Ther Sci*, 2015, 27(6):1747—1749.
 - [15] Wang JS, Lee SB, Moon SH. The immediate effect of PNF pattern on muscle tone and muscle stiffness in chronic stroke patient[J]. *Journal of Physical Therapy Science*, 2016, 28(3):967—970.
 - [16] Chung BPH. Effectiveness of robotic-assisted gait training in stroke rehabilitation: A retrospective matched control study[J]. *Hong Kong Physiotherapy Journal*, 2017, 36:10—16.
 - [17] 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):S174—S188.
 - [18] Chrif F, Nef T, Lungarella M, et al. Control design for a lower-limb paediatric therapy device using linear motor technology[J]. *Biomedical Signal Processing and Control*, 2017, 38:119—127.
 - [19] Jones TA, Adkins DL. Motor system reorganization after stroke: stimulating and training toward Perfection[J]. *Physiology*, 2015, 30(5):358.
 - [20] Vér C, Emri M, Spisák T, et al. The Effect of passive movement for paretic ankle-foot and brain activity in post-stroke patients[J]. *European Neurology*, 2016, 76(3—4): 132—142.
 - [21] 荣积峰, 吴毅, 路微波, 等. 四肢联动对脑卒中偏瘫患者平衡功能和步行能力的影响[J]. *中国康复医学杂志*, 2015, 30(10):1063—1065.
 - [22] Saint L. Rehabilitation robotics[J]. *Technology & Health Care*, 2011, 19(6):483—495.