

步态矫正康复技术研究进展

徐晶晶, 邹任玲*, 胡婧怡, 杨娅丹, 徐澜菲, 康清华, 李丹, 胡秀枋

上海理工大学健康科学与工程学院, 上海

收稿日期: 2023年1月9日; 录用日期: 2023年2月9日; 发布日期: 2023年2月16日

摘要

良好的步态对人体健康有积极影响, 降低慢性疾病风险, 随着医疗康复技术的发展, 近年来针对步态异常的矫正康复技术不断得到完善。目前步态矫正有人工辅助技术, 步态矫正机器辅助技术以及虚拟现实技术辅助的结合应用三种模式, 其中先进的虚拟现实技术与步态矫正机器的结合, 用于训练过程提供任务导向和环境模拟, 为患者带来实时的真实感觉反馈, 增加训练乐趣, 强化自主训练意图, 提高了训练效果。本文分析三种技术的康复模式优缺点, 以及相关产品、发展分布现状以及目前国内外康复矫正技术的发展概况, 重点对虚拟现实技术与步态矫正训练技术的发展进行前瞻性的展望。

关键词

步态训练, 步态矫正, 人工辅助康复, 虚拟现实技术

Research Progress in Gait Correction Rehabilitation Technology

Jingjing Xu, Renling Zou*, Jingyi Hu, Yadan Yang, Lanfei Xu, Qinghua Kang, Dan Li, Xiufang Hu

School of Health Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Jan. 9th, 2023; accepted: Feb. 9th, 2023; published: Feb. 16th, 2023

Abstract

Good gait has a positive impact on human health and reduces the risk of chronic diseases, and with the development of medical rehabilitation technology, corrective rehabilitation techniques for gait abnormalities have been improved in recent years. At present, there are three modes of gait correction: manual assisted technology, gait correction machine assisted technology and the combined application of virtual reality technology assisted. Among them, the combination of advanced

*通讯作者。

文章引用: 徐晶晶, 邹任玲, 胡婧怡, 杨娅丹, 徐澜菲, 康清华, 李丹, 胡秀枋. 步态矫正康复技术研究进展[J]. 软件工程与应用, 2023, 12(1): 51-58. DOI: 10.12677/sea.2023.121006

virtual reality technology and gait correction machine is used for the training process to provide task-oriented and environmental simulation, which brings real-time realistic sensory feedback to patients, increases the fun of training, strengthens the autonomous training intention and improves the training effect. This paper analyzes the advantages and disadvantages of the rehabilitation models of the three technologies, as well as related products, the current status of development distribution, and the current development overview of rehabilitation correction technology at home and abroad, focusing on the future development of virtual reality technology and gait correction training technology with a forward-looking outlook.

Keywords

Gait Training, Gait Correction, Artificial Assisted Rehabilitation, Virtual Reality Technology

Copyright © 2023 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

步态是指人在走路时的基本姿态和动作特征[1],良好的步态对人体有积极影响,降低慢性疾病风险。较多异常步态的情况常见于一些神经系统疾病或其他系统疾病患者[2],如帕金森患者会有慌张步态,表现为身体前倾,起步慢后渐渐变快[3],在长期使用左旋多巴类药物之后,部分患者出现“冻结步态”[4],即活动时突然肢体僵直,不能运动,一段时间后又可以活动正常[5];中风患者后遗症会出现偏瘫步态,表现为病侧上肢屈曲,摆动消失,大腿小腿均伸直,脚向外甩呈画圆弧状[6]。除了病理因素,后天步行习惯不良也会导致异常步态,如骨盆前倾、膝过伸、膝塌陷、“外八字”、“内八字”等。

异常步态易让患者产生病耻感,长期的步态异常还会对患者的身体造成伤害,如脊髓神经压迫,骨盆倾斜、脊柱侧弯、肌肉疼痛等[7]。因此步态矫正需要予以重视。本文对器械矫正技术与虚拟现实技术的结合进行综述,提出其与传统矫正康复技术相比的优势,并指出现有步态矫正康复技术的不足,对未来设备技术的发展做出展望。

2. 步态矫正康复技术

2.1. 步态矫正人工辅助

传统的人工辅助步态矫正训练是医生通过观察诊断出患者的病症以及原因,通过药物、按摩、针灸、体态训练、佩戴矫形器等方法帮助恢复神经肌肉功能。如针对帕金森患者的步态训练中,医护人员会设定每天的步态训练,包括迈步训练与按照标记行走训练,要求患者直视前方,协调上肢与下肢,向前跨大步,在地板上加设标记根据患者训练情况加设障碍物[8];中风患者在能够站立后在医生辅助保护下,进行迈台阶、斜板站立、上下楼梯以及步行姿态矫正训练[9];内八字患者可以穿戴定制的生物力学矫正鞋垫,通过足底力学矫正内八字步态,鞋垫能够有效支撑足弓,同时使足跟保持中立位,从而稳定足踝[10]。

中医在步态矫正的诊断方案里的应用也很广泛。陈双钱等[11]通过观察中药熏洗和针刺联合康复训练对中风后患者足内翻的治疗效果,发现观察组有效率为93.02%高于对照组的74.42%,证明该治疗方案能明显改善患者步态及下肢运动功能。蔡艺芳等[12]运用中医汤药:益气活血通络方,联合步态训练对脑卒中恢复期的偏瘫患者进行康复治疗,研究证明该方法可以改善患者步态并提升患者行动能力和日常生活能力。

2.2. 步态矫正机器辅助

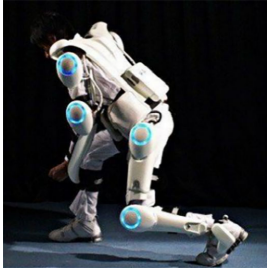

传统步态矫正技术能够为患者设定个性化矫正方案,但医护人员工作量大,在无辅助的情况下患者训练困难,训练过程乏味且漫长,因此训练过程利用器械矫正技术能很好的降低步态矫正康复难度。通过步态训练器械可以训练矫正步态,分析步态参数来记录训练过程行走功能的变化[13],评估训练效果[14],制定训练计划,常用步态参数有步态周期、运动学参数、动力学参数等[15]。步态训练器械可以大致分为外骨骼类的训练机器人以及利用末端驱动式的康复训练系统[16]。

外骨骼型步态康复机器人是多学科交叉的技术产品,其中涵盖多学科包含生物力学、人体工程学、计算机学、机器人学等;研发技术涉及驱动技术、传感器技术、人机交互技术、人工智能技术等[16]。在步态康复训练中多针对髋、膝、踝关节的运动进行矫正,通过改善关节活动角度与肌肉活性,从而进一步改善患者的步态参数。

步态训练矫正的外骨骼机器人的知名产品有:瑞士的 Hocama 公司研发的 Lokomat、日本 Cyberdyne 公司研发混合辅助肢体 HAL、以色列 Rewalk 器械公司设计的康复外骨骼机器人 Rewalk、国内北京大艾机器人自主研发的创新产品 AiWalker·艾康、Ailegs·艾动也是很好的产品等,表 1 罗列上述四类产品,并简述产品特点。

Table 1. Exoskeleton lower limb rehabilitation robot

表 1. 外骨骼式下肢康复机器人

| 图片 | 产品名称 | 产品特点 |
|---|--------------|--|
|  | Lokomat [17] | 系统包含悬吊减重模块、机械腿、跑步机等模块;其外骨骼可驱动患者下肢进行矢状面步态运动,四个旋转关节可以驱动髋关节、膝关节做屈伸动作;系统能够设定不同运动轨迹,从而达到不同步态训练要求。 |
|  | HAL [18] | 系统通过在大腿运动神经处布置传感器,利用表面肌电信号采集运动指令;具有生物意识控制系统和自主控制系统;外骨骼可以代替执行站立、步行和攀爬等动作。 |
|  | Rewalk [19] | 系统通过腕部传感器以及体感技术实时分析调整步态;但只能选择被动训练模式,需借助平衡拐杖;体感芯片能够分析躯干倾斜角度感知重心变化,驱动下肢模拟下肢自然行走,控制步速。 |

Continued



AiWalker · 艾康、
Ailegs · 艾动[20]




艾康是四轮式台架型康复训练机器人,可实现原地步行、步态训练和功能评估等功能;艾动是一种双足型康复训练机器人,可带动患者以自然行走步态行走

外骨骼型步态康复机器人能够帮助患者站立,通过运动指令驱动下肢运动,辅助患者步行。但是此类产品会影响自身平衡,导致一些使用安全问题与使用舒适度问题;除此之外每个人的步态存在个体差异,因此外骨骼发展难点在于如何根据每个患者自身情况来准确模拟其正确步态。因此关键技术难点在于:1) 准确分析识别运动意图;2) 控制系统的准确性、稳定性、实时性以及个性化。

末端驱动式机器人是通过运动踏板带动患者的脚部运动,进而带动膝关节与髋关节运动。通过模拟步行中支撑期和摆动期的运动轨迹帮助患者进行下肢步行训练[21]。与外骨骼机器人相比,不需要患者与机器人关节对齐,因此不会对膝关节造成压迫、安全性更高。目前下肢末端驱动式机器人多采用踏板结构,如2010年日本筑波大学设计研发成果 GaitMaster5、泰国的 I-Walk、Reha-Stim 公司开发的步态训练系统 Gait Trainer 等,表 2 罗列上述三类产品,并简述产品特点。

Table 2. End-driven robots

表 2. 末端驱动式机器人

| 图片 | 产品名称 | 产品特点 |
|---|-------------------|--|
|  | GaitMaster5 [22] | 系统包含具有 3 个自由度的踏板,可以模拟任意方向步态轨迹;升降台可以辅助模拟平地、台阶、坡道等模式的训练,分析患者的步态参数,调整主动与被动的训练模式 |
|  | I-Walk [23] | 康复训练时,患者佩戴安全装置,可以站在踏板上且训练节奏可以自行调节 |
|  | Gait Trainer [24] | 系统包含悬吊减重模块,此外还可以选配功能电刺激接口,以末端执行器为基础的步态训练,提供了一种安全、密集重复的运动疗法。 |

末端驱动式训练机器系统的结构较为简单, 成本较低, 安全性更高, 通过利用踏板可以模拟多种模式的训练, 帮助患者训练下肢肌力, 适应生活的各类步行场景, 但是此类训练系统运动较为“粗大”, 在步态矫正中, 无法对单独关节进行特定的康复训练, 所以难以对因关节运动错误而导致的步态异常进行矫正。

2.3. 虚拟现实技术辅助

虚拟现实技术(Virtual Reality Technology)是计算机生成虚拟世界, 通过对用户生成视觉、听觉和触觉的感受来交互操作的技术, 其特征包括沉浸、交互和想象[25]。它融合了数字图像处理、计算机图形学、传感器技术等多种信息技术[26]。虚拟现实技术需要外部设备实现虚拟与现实的交互功能, 应用于视觉效果的外部设备常见产品有三维投影仪、头盔显示器、VR 眼镜等, 其中部分视觉外部设备还会带有立体声耳机可以让用户沉浸于虚拟世界, 除了基于视觉的外部设备之外还有数据手套、语音识别与合成系统、三维鼠标等外部设备可以辅助提高用户沉浸感[27]。随着虚拟现实技术的发展以及各种康复设备的完善, 虚拟现实技术越来越多地应用于步态康复训练与矫正的治疗与评估中。

传统步态训练场景常定于医院康复室, 训练乏味枯燥, 患者易产生抵触心理, 而虚拟现实技术可以通过三维建模, 数字图像技术模拟现实生活的各种场景, 患者可以选择模拟行走在街头、公园、商场等地方, 可以让患者暂时忘记病症[28]。步态训练和步态矫正的基础在于有效地重复动作, 恢复肌肉神经功能, 虚拟现实技术可以以丰富、有趣的训练任务为目的的训练系统设计, 患者可以在虚拟世界中有目标且更有成就感地完成训练动作[29]。虚拟现实技术能对患者的训练实时反馈, 患者和医生可以随时了解训练情况, 根据实际调整训练计划。

国外的虚拟现实技术发展较早, 在医疗康复领域的应用较多, 如上述的 Lokomat 系列新产品中, 在原有的基础上增加情景模拟生物反馈系统, 设计虚拟环境趣味生动, 能实时反馈训练情况的游戏激发患者训练的积极主动性, 游戏训练内容包含对称性、动机、注意力、肌力等, 可以很好的践行任务导向型训练理念[30]。丹麦的 InnoVaaid 情景互助智能步行评估训练系统, 如图 1 [31], 具有电脑化情景互动功能, 针对脑瘫或其他神经系统功能受限的患者, 能够激发下肢运动和特定肌肉群活动, 训练行走功能和关节活动性[32]。Walker 等[33]将虚拟现实与具有减重功能的跑步机训练机器结合, 跑步机前有电视屏幕显示虚拟世界, 给患者一种走在城市街道的感觉, 同时患者佩戴的头戴式位置传感器会提供姿势反馈, 当患者姿势不正确, 系统会通过听觉反馈, 提示患者纠正, 实验结果证明, 参与者的行走能力都有显著提高。Paolini 等人[34]提出用 Kinect 与虚拟现实相结合用于基于跑步机的步态训练, 该系统利用 Kinect 的深度相机在训练时实时跟踪足部位置和方向, 在虚拟环境中再现足部的运动。

相对于国外而言, 虚拟现实技术在国内的发展较晚, 并未广泛应用于步态康复训练与矫正中, 发展潜力较大。广州一康的 A1 下肢智能反馈训练系统, 如图 2 [35], 应用于行走或移动功能不健全患者的早期康复训练, 系统支持设置患者训练参数如步频、左右膝关节踏步的关节活动范围、治疗时间等, 其中还包含趣味训练部分, 患者可以模拟原地踏步运动使游戏人物完成跨栏人物, 患者以游戏的方式主动参与训练, 可以减少被动训练的枯燥性, 提高训练效果[36]。张磊杰等[37]提出一种基于虚拟现实的步态训练康复机器人系统, 通过对患者的步速、心跳等生理信息的有效且快速提取, 并将部分生理信息体现在虚拟游戏中, 提高患者的交互体验感以及康复训练的积极性。郭晓辉等[38]设计实现了基于虚拟现实的下肢康复训练系统, 利用 Labview 和 Matlab 等软件对数据实时通信和反馈处理, 通过场景建模以及动画设计, 建立城市生活街区为主要环境的虚拟世界, 并整合到 Virtual gait training 下肢反馈训练系统, 该系统能够实现对患者主被动协同刺激训练, 能够更好地刺激大脑运动区的镜像神经元, 丰富真实的虚拟场景能够有效帮助强化自主运动意图。



Figure 1. Innovaid situational mutual aid intelligent walking evaluation training system

图 1. Innovaid 情景互助智能步行评估训练系统



Figure 2. A1 lower limb intelligent feedback training system

图 2. A1 下肢智能反馈训练系统

3. 结论与展望

综上，三种步态矫正康复技术临床使用广泛，人工辅助的步态康复与矫正疗法能为患者制定个性化治疗方案，并且临床效果好，但该疗法依赖医生的个人经验，训练矫正过程困难且枯燥。步态矫正机器辅助技术能减少医生工作量，并有效帮助患者提高训练效果，根据矫正机器测得的步态参数，能够判断患者训练情况，为医生制定康复矫正方案提供临床依据，但各类步态矫正机器成本高，体积较大，使用安全性和舒适度不高，且多针对一些神经系统疾病或骨科疾病，缺少对因后天因素造成步态异常的矫正训练。目前虚拟现实技术与步态矫正机器的结合多用于训练过程提供任务导向和环境模拟，为患者带来实时的真实感觉反馈，增加训练乐趣，强化自主训练意图，提高训练效果，但目前虚拟现实技术的效果真实性不强，缺少针对不同病症的需求来设计矫正方案从而发挥虚拟现实技术的最大作用。

为了克服以往矫正康复技术的缺点，机器辅助步态矫正技术的研究进一步发展需要考虑使设备体积更加轻便，成本降低，安全性得到保障；增加引起步态异常的不同部位进行针对性矫正的功能；在结合虚拟现实技术时为患者提供更高的沉浸式体验；针对不同病症设计虚拟现实环境以及训练模式，集成虚拟现实环境进一步符合康复矫正要求，训练模式有效且个性化，增加患者自身情况获取并分析患者训练步态，划分患者训练等级，从而确定合适的训练时间和强度来有效实现步态矫正。

基金项目

上海市科技创新行动计划产学研医合作领域项目(21S31906000): 基于神经电信号的 PKD 诊断与电刺激康复系统的研制, 上海第六人民医院、上海理工大学医工交叉项目。

参考文献

- [1] 张峻霞, 高昆, 谢兵. 步态分析研究综述[J]. 包装工程, 2022, 43(10): 41-53+14.
- [2] 姚杰, 任韦燕, 蒲放. 康复领域步态研究的进展与展望[J]. 医用生物力学, 2022, 37(5): 787-788.
- [3] 卢俏丽, 李晨. 磁共振成像新技术在帕金森病及特发性震颤诊断及鉴别中的研究[J]. 临床医药实践, 2022, 31(11): 842-845.
- [4] 王翰麟, 李继平, 魏婧. 帕金森病冻结步态症状电生理机制的研究进展[J]. 脑与神经疾病杂志, 2022, 30(10): 658-661+609.
- [5] 申煜, 曹倩, 古训瑚, 等. 以冻结步态为临床表现的基底节钙化 1 例报道并文献复习[J]. 中华神经医学杂志, 2022, 21(1): 74-75.
- [6] 林少英, 郑一帆, 叶莉, 洪华. 神经肌肉关节促进法对脑梗死偏瘫患者下肢肌张力的影响[J]. 新医学, 2022, 53(9): 660-664.
- [7] 苏愉钦, 袁森. 姿势异常对青少年关节功能和动作表现的影响[J]. 体育师友, 2020, 43(6): 66-67.
- [8] 章帆, 杜晓亮, 王艳. 简易步态训练联合太极拳训练在帕金森患者预防跌倒中的应用效果[J]. 当代护士(上旬刊), 2021, 28(7): 74-75.
- [9] 万燕. 中频脉冲治疗仪联合综合康复护理对脑卒中偏瘫患者康复效果的影响[J]. 黑龙江医学, 2022, 46(12): 1489-1491.
- [10] 金哲, 冯通, 王向东, 等. 不同矫形鞋垫对老年人足底的生物力学影响[J]. 医用生物力学, 2022, 37(5): 868-873.
- [11] 陈双钱, 林定艺, 金永喜. 中药熏洗、针刺联合康复训练治疗中风后足内翻临床研究[J]. 新中医, 2022, 54(10): 180-183.
- [12] 蔡艺芳. 益气活血通络方加味联合步态训练在缺血性脑卒中恢复期偏瘫患者中的应用效果[J]. 中外医学研究, 2022, 20(28): 23-27.
- [13] Yamamoto, M., Shimatani, K., Ishige, Y., et al. (2022) Verification of Gait Analysis Method Fusing Camera-Based Pose Estimation and an IMU Sensor in Various Gait Conditions. *Scientific Reports*, **12**, Article No. 17719. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-22246-5>
- [14] Sethi, D., Bharti, S. and Prakash, C. (2022) A Comprehensive Survey on Gait Analysis: History, Parameters, Approaches, Pose Estimation, and Future Work. *Artificial Intelligence in Medicine*, **129**, Article ID: 102314. <https://doi.org/10.1016/j.artmed.2022.102314>
- [15] 张孟利, 李庆, 孙建淼, 吴琳娜. 骨盆控制训练对脑卒中患者偏瘫步态的时空及关节运动学参数的影响[J]. 临床医学研究与实践, 2022, 7(28): 152-155.
- [16] 石男强, 刘刚峰, 郑天骄, 等. 下肢康复机器人的研究进展与临床应用[J]. 信息与控制, 2021, 50(1): 43-53.
- [17] Van Dellen, F. and Labruyere, R. (2022) Settings Matter: A Scoping Review on Parameters in Robot-Assisted Gait Therapy Identifies the Importance of Reporting Standards. *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, **19**, Article No. 40. <https://doi.org/10.1186/s12984-022-01017-3>
- [18] Ogata, T., Abe, H., Samura, K., et al. (2015) Hybrid Assistive Limb (HAL) Rehabilitation in Patients with Acute Hemorrhagic Stroke. *Neurologia Medico-Chirurgica*, **55**, 901-906. <https://doi.org/10.2176/nmc.oa.2015-0209>
- [19] (2022) "Patch Systems for Use with Assistive Exosuit" in Patent Application Approval Process (USPTO 20220079792). 1830-1832.
- [20] 丁逸苇, 涂利娟, 刘怡希, 等. 可穿戴式下肢外骨骼康复机器人研究进展[J]. 机器人, 2022, 44(5): 522-532.
- [21] 石男强, 刘刚峰, 郑天骄, 李文胜, 麦晓明, 朱延河, 赵杰. 下肢康复机器人的研究进展与临床应用[J]. 信息与控制, 2021, 50(1): 43-53.
- [22] Tanaka, N., Saitou, H., Takao, T., et al. (2012) Effects of Gait Rehabilitation with a Footpad-Type Locomotion Interface in Patients with Chronic Post-Stroke Hemiparesis: A Pilot Study. *Clinical Rehabilitation*, **26**, 686-695. <https://doi.org/10.1177/0269215511432356>
- [23] Pansuksawat, N., Tantilipikorn, P., Kooncumchoo, P., et al. (2020) Effects of I-Walk Training on Gait Performances in

- Patients with Chronic Stroke. *Vajira Medical Journal: Journal of Urban Medicine*, **64**, 243-254.
- [24] Hesse, S. and Uhlenbrock, D. (2000) A Mechanized Gait Trainer for Restoration of Gait. *Journal of Rehabilitation Research and Development*, **37**, 701-708.
- [25] Bellazzi, A., Bellia, L., Chinazzo, G., *et al.* (2022) Virtual Reality for Assessing Visual Quality and Lighting Perception: A Systematic Review. *Building and Environment*, **209**, 108674.1-108674.22. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108674>
- [26] Petros, F.E., Klenk, M.E. and Agrawal, S.K. (2022) Changes in Gait Parameters Due to Visual and Head Oscillations in Football Players and Non-Athletes. *IEEE Robotics and Automation Letters*, **7**, 7171-7176. <https://doi.org/10.1109/LRA.2022.3181369>
- [27] 范丽亚, 马介渊, 张克发, 等. 虚拟现实硬件产业的发展[J]. 科技导报, 2019, 37(5): 81-88.
- [28] 殷凤梅, 程洋. 基于5G网络的VR虚拟现实旅游平台的设计与实现[J]. 电脑知识与技术, 2022, 18(25): 64-66+92.
- [29] Sun, Q. (2021) Leveraging Human Visual Perception for an Optimized Virtual Reality Experience. *IEEE Computer Graphics and Applications*, **41**, 164-170. <https://doi.org/10.1109/MCG.2021.3113392>
- [30] Alashram, A.R., Annino, G. and Padua, E. (2021) Robot-Assisted Gait Training in Individuals with Spinal Cord Injury: A Systematic Review for the Clinical Effectiveness of Lokomat. *Journal of Clinical Neuroscience*, **91**, 260-269. <https://doi.org/10.1016/j.jocn.2021.07.019>
- [31] Innovaid 情景互动智能步行评估训练系统-脑中风-深圳润泽康复医疗中心[Z]. 2022-11-07.
- [32] 叶倩. 矫正手法结合情景互动智能步行训练对痉挛型脑瘫患儿三维步态时空的影响[J]. 实用中西医结合临床, 2020, 20(12): 39-40.
- [33] Walker, M.L., Ringleb, S.I., Maihafer, G.C., *et al.* (2010) Virtual Reality-Enhanced Partial Body Weight-Supported Treadmill Training Poststroke: Feasibility and Effectiveness in 6 Subjects. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, **91**, 115-122. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2009.09.009>
- [34] Paolini, G., Peruzzi, A., Mirelman, A., *et al.* (2014) Validation of a Method for Real Time Foot Position and Orientation Tracking with Microsoft Kinect Technology for Use in Virtual Reality and Treadmill Based Gait Training Programs. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering: A Publication of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, **22**, 997-1002. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2013.2282868>
- [35] 下肢智能反馈训练系统 A1_广州一康医疗设备实业有限公司|福祉展[Z]. 2022-11-07.
- [36] 程泉, 杨威, 陈林, 谭同才. 镜像疗法联合下肢康复机器人治疗对脑卒中偏瘫患者下肢运动和平衡功能的影响[J]. 浙江中西医结合杂志, 2021, 31(12): 1118-1121.
- [37] 张磊杰, 刘永久, 王慧, 等. 基于虚拟现实的步态训练康复机器人系统软件设计[J]. 计算机系统应用, 2012, 21(12): 8-11+21.
- [38] 郭晓辉, 王晶, 杨扬, 等. 基于虚拟现实的下肢主被动康复训练系统研究[J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(2): 124-131.