

· 综述 · doi:10.3969/j.issn.1671-8348.2024.10.022

网络首发 [https://link.cnki.net/urlid/50.1097.R.20240510.1608.006\(2024-05-11\)](https://link.cnki.net/urlid/50.1097.R.20240510.1608.006(2024-05-11))

下肢康复机器人应用于骨科患者康复治疗的研究进展*

尹 聪¹, 李开南^{2△}

(1. 遵义医科大学第一临床学院, 贵州遵义 563000; 2. 成都大学附属医院骨科, 成都 610031)

[摘要] 随着人口老龄化加剧, 患有由下肢骨折及骨关节炎或其他创伤引起的下肢移动障碍人群数量正逐年增加。传统康复治疗手段对患者和治疗师的要求很高。近年下肢康复机器人的研究和应用取得了重大突破。下肢康复机器人是一种自动化康复训练设备, 主要基于运动再学习的原理, 让患者进行重复、密集、精确任务导向的运动, 以促进下肢功能康复。本文介绍了下肢康复机器人的发展历程, 对下肢康复机器人进行了分类, 并回顾了康复机器人在下肢 3 个部位(髋关节、膝关节、踝关节)的步态康复应用场景, 在此基础上对未来下肢康复机器人在骨科应用的研究和发展趋势进行了讨论。

[关键词] 下肢康复机器人; 康复治疗; 骨科

[中图分类号] R496 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1671-8348(2024)10-1563-06

Research progress of the application of lower limb rehabilitation robot in rehabilitation treatment of orthopedic patients*

YIN Cong¹, LI Kainan^{2△}

(1. First Clinical College, Zunyi Medical University, Zunyi, Guizhou 563000, China; 2. Department of Orthopedics, Affiliated Hospital of Chengdu University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

[Abstract] With the exacerbation of population aging, the number of individuals suffering from lower limb mobility impairments caused by lower limb fractures, osteoarthritis, or other traumas is increasing annually. Traditional rehabilitation methods impose high demands on both patients and therapists. Over the past few decades, significant breakthroughs have been made in the research and application of lower limb rehabilitation robots. Lower limb rehabilitation robots, as automated rehabilitation training devices, are primarily based on the principle of motor relearning, enabling patients to engage in repetitive, intensive, and precise task-oriented movements to promote lower limb functional recovery. This paper presented the development history of lower limb rehabilitation robots, categorizes them, and reviewed their gait rehabilitation applications in three lower limb segments (hip joint, knee joint, ankle joint). Based on this, the research and development trends of lower limb rehabilitation robots in orthopedics were discussed.

[Key words] lower limb rehabilitation robot; rehabilitation treatment; orthopedics

据国家统计局数据显示, 2022 年全国 60 岁以上老年人口占总人口数为 19.8%, 我国已迈入老龄化社会阶段^[1]。老年人常面临由下肢骨折、骨关节炎等骨骼肌肉疾病导致的运动功能障碍^[2]。传统康复手段难以解决当下康复需求剧增、人力成本昂贵、康复评估体系缺乏标准化等难题, 加速骨科术后患者下肢功能康复以期减少卧床并发症, 减轻社会医疗护理负担成为当下研究热点问题。近年来患者康复治疗方

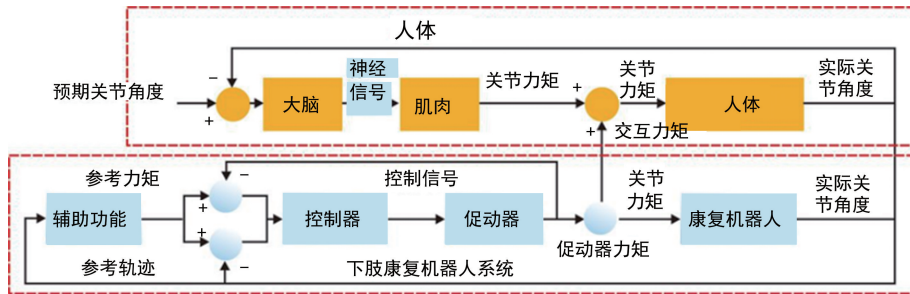
案不断丰富, 下肢康复机器人开始运用于患者肌力、肌张力、平衡能力、本体感觉等康复治疗。相较于传统物理康复治疗, 康复机器人优点在于效率高、康复动作控制精确、可重复性高, 并可进行个体化康复训练, 下肢康复机器人运用于康复治疗将是一种不可逆转的趋势^[3], 其已经展示出在提供康复训练和运动辅助方面独特的技术优势^[4]。国外目前已将下肢康复机器人运用于下肢关节置换术后患者的步态康复训练^[5], 而国内主要还集中应用于恢复偏瘫患者下肢运动功能与步行能力的研究^[3]。本文将对下肢康复机器人的运用现状进行综述, 以期

1 下肢康复机器人康复治疗的基本理论

为下肢康复机器人运用于骨科术后患者的康复方案提供新的思路。下肢康复机器人工作原理是使用传感器收集患者需康复部位的角度、方向、能量等客观信息, 随后将这些信息传输至控制器, 基于对这些客观信息的分析

和处理,控制器会调整机器人康复动作,最终由执行机构与患者一起完成康复运动,具体工作机制见图 1。下肢康复机器人可提供高精度的个性化训练,使患者学习的运动训练储存在大脑皮质。不同环境下进行有目的步态训练能够向大脑中枢输入正常的平衡感知信号,这有助于促进大脑的可塑性康复。此外,这种训练还能增强下肢、骨盆等关键部位的肌肉力量

和控制能力,从而有效改善不同类型的步态功能障碍。下肢康复机器人联合其他设备通过康复训练在改善中枢神经系统、骨骼肌肉系统、视觉系统、本体感觉系统、前庭系统及认知系统方面有积极的作用,而上述系统的改善对患者下肢功能获得康复起着重要作用^[6-9]。通常,骨科康复训练包括执行特定的运动,激发运动的可塑性、最大程度恢复下肢功能。



+: 正反馈; -: 负反馈。

图 1 下肢康复机器人工作机制图

2 下肢康复机器人的研究现状

下肢康复机器人的研究始于 20 世纪 60 年代末,以人力外骨骼的形式开始,初期主要用于军事领域,随后更多用于康复和辅助的医疗外骨骼上。自 1994 年 Lokomat 诞生后康复机器人技术在体系结构和应用领域方面不断发展。针对不同部位,先后开发了膝关节、踝关节等特定部位的下肢康复机器人。此外,由于传统下肢外骨骼机器人存在穿戴不适等问题,推出了轻量级 Soft Exosuit 柔性气动外骨骼机器人。下

肢康复机器人依据其治疗目的,可划分为治疗型和辅助型。下肢康复机器人根据使用者的姿势不同,分为站立、坐姿和卧姿 3 种类型。从驱动技术上看,下肢康复机器人可以分为电动、气压和液压 3 种驱动方式。根据自由度分类可分为一个自由度、两个自由度及多个自由度^[3],其可以提供一系列不同形式的创伤后、手术后或老年人医疗保健康复服务。目前应用的下肢康复机器人概述见表 1。

表 1 下肢康复机器人概述

| 类目 | 研发机构 | 应用领域 | 驱动形式 |
|----------------------|-----------------------|-------------|------|
| Lokomat 步行康复机器人 | 瑞士 Hocoma 公司 | 步态康复 | 电驱动 |
| LokoHelp 下肢康复机器人 | 德国 WOODWAY 公司 | 步态康复 | 电驱动 |
| 平衡障碍康复机器人 | 中国人民解放军总医院等 | 步态康复 | 电驱动 |
| Rewalk 外骨骼机器人 | 以色列 ReWalkRobotics 公司 | 人体运动辅助 | 电驱动 |
| HAL 外骨骼机器人 | 日本筑波大学 | 人体力量增强和步态康复 | 电驱动 |
| Indego 下肢外骨骼机器人 | 美国 Parker Hannifin 公司 | 步态康复和人体运动辅助 | 电驱动 |
| CUHK-EXO 下肢外骨骼机器人 | 香港中文大学 | 人体运动辅助 | 电驱动 |
| Auto-Lee 自平衡外骨骼机器人 | 中国科学院研究所 | 步态康复 | 电驱动 |
| MotionMaker 坐卧式康复机器人 | 瑞士 SWORTE 公司 | 步态康复 | 电驱动 |
| MOTOMed 康复训练器 | 德国 RECK 公司 | 人体力量增强和步态康复 | 电驱动 |

2.1 站立式下肢康复机器人

依靠减重系统进行康复的下肢机器人: Lokomat 步行康复训练机器人诞生于 1994 年瑞士 Hocoma 公司。Lokomat 步行康复机器人是经典的站立式康复机器人,该系统主要由医用跑台、减重系统、驱动装置三大系统构成。减重系统通过电机驱动,悬吊绑带支撑患者部分体重。驱动系统为左右对称的机械腿,通过电机装置提供动力从而使患者完成步行运动。医用跑台在运动协调和步态矫正中起了关键作用。通

过引导患者在医用跑台上进行模拟正常人的行走轨迹,从而恢复患者下肢功能^[10]。2006 年德国 WOODWAY 公司研发了 LokoHelp 下肢康复机器人,LokoHelp 下肢康复训练机器人是由悬挂减重系统、跑步机、学习机组成。不仅可以进行 Lokomat 步行康复训练机器人的步态训练,而且可以通过倾斜平台实现高难度训练,例如上坡、下坡、后退、侧步等训练。但相较于 Lokomat 步行康复机器人 LokoHelp 下肢康复训练机器人运用局限性较大,原因在于只能

使用于固定的步态行走。国内依靠减重系统进行康复训练的下肢机器人发展相对较晚,上海理工大学于 2014 年研发的 M300 反重力跑步机,是利用气囊减重的机器人,患者需穿戴紧身裤连接上下气囊进行减重从而在跑步机上锻炼。但该机器由于移动不便,并没有广泛运用于临床^[11]。2019 年由中国人民解放军总医院联合北京航空航天大学等单位研制的平衡障碍康复机器人,该机器人结合人体生物力学特点,可实现多功能、多场景、多方案康复训练^[12]。日本筑波大学赛博电子实验室开发的 HAL 外骨骼机器人已运用于临床研究,不仅有助于患者步态紊乱的康复,还能够帮助患者恢复负重能力。其采用髋、膝、踝 3 个关节实现空间运动,以其外部直接支撑力帮助患者进行康复训练。美国 Parker Hannifin 公司开发的 Indego 下肢外骨骼康复机器人,该机器人可在轮椅上穿戴,其结构包括髋关节模块、大腿、小腿模块,通过中央处理器控制驱动电机实现多模式康复训练^[13-14]。国内下肢外骨骼康复机器人起步较晚,2015 年香港中文大学研发了 CUHK-EXO 下肢外骨骼康复机器人,该机器人由电动机驱动髋关节、膝关节、踝关节运动,但需另外使用拐杖加强支撑才能为患者提供稳定的步态辅助康复训练^[15-16]。2019 年中国科学院研究所开发的 Auto-Lee 自平衡外骨骼机器人,该机器人能在无辅助力量支撑下保持平衡行走,其不仅可以进行多模式人机交互,而且采用模块化结构更易于大规模推广^[17]。下肢外骨骼康复机器人无须外力辅助,可直接支持患者功能锻炼,在树立患者下肢功能康复信心上明显优于坐卧式康复机器人,下肢外骨骼康复机器人作为截肢患者的一种“智能假肢”是未来研究方向之一。不过其造价高昂、控制系统复杂、数字化及智能化要求较高,在临床上不易推广,在接下来的研究中需要进一步模块化设计节约成本。

2.2 坐卧式下肢康复机器人

SWORTE 公司研发的 MotionMaker 是具有代表性的坐卧式下肢康复机器人。机械臂安装于座椅两侧,作为下肢的驱动系统,患者坐于座椅上双下肢通过两侧机械臂模拟出下肢行走的康复训练。通过压力传感器及角度传感器的反馈控制达到良好的训练效果^[18]。德国 RECK 公司生产的 MOTomed 康复训练器是一种类似踩踏自行车实现圆周运动的设备,通过圆周旋转运动带动患者下肢关节的规律活动,为患者提供被动、主动及辅助训练模式^[19]。Physiotherabot 是 2011 年由土耳其开发的坐卧式下肢康复机器人,座椅承担了患者的减重,患者可以进行主动及被动的训练,其系统可分为学习模式和训练模式,通过传感器及相关反馈系统来使患者适应。其机械活动关节在座椅的一侧,可帮助患者行膝关节、髋关节、踝关节的相关运动,但该系统只能活动一侧关节,且存在生理数据采集缺失,所以在临床运用上并

未大规模推广^[20]。国内坐卧式下肢康复机器人相关研究如合肥工业大学研制的坐姿康复训练机器人,采用杠杆结构来进行各关节的活动从而达到训练的目的,其优点在于具有上肢的杠杆,可进行其上肢的协调运动,通过设置杠杆的角度及长度实现多模式的运动训练^[21-22]。

3 下肢康复机器人在骨科的临床应用

3.1 髋关节康复

我国每年约增加 120 万例老年髋部骨折患者。髋部骨折占成年人全身骨折 7.01%,70 岁以上的老年中,髋部骨折占全身骨折的 23.79%^[23]。手术已成为老年髋部骨折的重要治疗方法,然而老年髋部骨折患者术后极易发生再跌倒的风险。据报告,髋部骨折后的 1 年内,只有 30% 的患者能恢复到骨折前的功能状态^[24],20% 的患者会再次骨折^[25-26],超过 20% 的患者死亡^[27],所以加速髋关节置换术后患者步态康复以期降低再跌倒发生率是迫切且必要的。髋关节下肢康复机器人作为关键关节康复工具,吸引了广泛的研究关注。SETOGUCHI 等^[28]使用 HAL 外骨架机器人作为髋关节术后康复的一部分对比常规经典物理治疗,评估了手术前后单次支撑时间(%)、双支撑时间(%)、步频(步/min)、步速(cm/s)、步长(cm)和前后侧变异性及活动度,结果显示 HAL 外骨架机器人使用后较常规经典物理治疗有明显改善。FANG 等^[29]报道了一种辅助髋关节伸展的柔性外骨骼机器人,能够为患者持续提供机械动能,减轻患者的运动负担。冯昱宁等^[30]、袁博等^[12]证实使用平衡障碍康复机器人作为髋关节术后康复手段(研究组)对比传统物理治疗手段(对照组),患者左右足跨步平均时间、平均步速、平均步长均优于对照组,研究组患者步态应激模式下的髋关节活动度小于对照组,髋关节峰值力矩大于对照组,研究组患者的肢体功能 Berg 平衡量表评分与 Fugl-Meyer 评分均高于对照组,研究组下肢功能康复结果优于对照组。

3.2 膝关节康复

在下肢运动功能障碍患者中膝关节疾病占比最多,膝关节下肢康复机器人得以广泛使用^[31]。全膝关节置换术(total knee arthroplasty,TKA)用于晚期骨关节炎患者,术后膝关节主动关节活动度(range of motion,ROM)的改善是手术成功的重要决定因素^[32]。为了促进膝关节主动 ROM 的改善,患者通常进行物理治疗师辅助的被动运动及持续被动运动(continuous passive motion,CPM),这是全膝关节置换术后物理治疗方案的典型干预措施。然而近年来,有许多关于 CPM 在改善 ROM 方面无效的报道^[33-35],与物理治疗师一起进行被动锻炼无明显的益处,应该推荐主动锻炼来代替。膝关节康复机器人的内在需求和现实意义正激励科研人员积极进行探索和研究,李建华等^[36]通过下肢康复机器人辅助步行训

练对 TKA 后患者功能恢复的影响的研究结果表明下肢康复机器人辅助下进行训练的患者的膝关节功能(HSS)评分、Berg 平衡量表评分、6 min 步行距离等均明显优于未使用机器人组。TORREALBA 等^[37]设计的膝关节外骨骼康复机器人 BAFSA 可以辅助患者膝关节进行功能康复训练。Keeogo 外骨骼康复机器人可为患者提供动态可调整的助力, MCGIBBON 等^[38]研究证实了 Keeogo 外骨骼康复机器人可以在多环境下改善患者膝关节功能的安全性和有效性。蔡立柏等^[39]研究证实下肢康复机器人(研究组)用于TKA后患者康复训练的康复效果优于常规人工辅助康复训练(对照组), 实验组主动和被动膝关节 ROM、膝关节功能评分及日常活动能力评分明显高于对照组, 下肢康复机器人用于 TKA 后患者康复训练, 可促进膝关节功能恢复, 提高康复效果。

3.3 踝关节康复

踝关节是人类所有关节中最复杂的关节之一, 人体正常运动期间踝关节在传递力和扭矩方面起着重要作用^[40]。很多因素均可能导致踝关节残疾或 ROM 受限, 对日常生活产生负面影响。例如, 对于老年人来说, 超重、过度的身体活动或缺乏身体活动, 以及先天性病理或由创伤性病变引起的损伤, 使得踝关节成为人体中最常见的受伤关节之一。当踝关节超出其功能活动范围时, 它们就会发生损伤, 一般来讲, 运动员和久坐缺乏运动的老年人群发生踝关节损伤的概率较高^[41]。下肢康复机器人在踝关节损伤后的康复锻炼中所发挥的优势明显。踝关节康复机器人可以分为两类: 主动矫形器(active orthosis, AO)和基于平台的机器人(platform robot, PR)。第一个足踝活动 AO 于 1935 年注册。这种 AO 在生物力学特性上纠正患者的步态周期。2006 年 GORDON 等^[42]开发的踝关节 AO 虽然能辅助跖屈和背屈训练, 但改善踝关节功能的有效性仍有待证实。2019 年 THALMAN 等^[43]介绍了一种柔性踝关节 AO, 其专门为治疗足下垂患者的步态问题设计。THIELE 等^[44]对 VACO ankle™ 型 AO 的研究表明, 该设备在促进足踝康复训练方面表现很好。RAFFALT 等^[45]发现使用 AO 能明显改善患者踝关节稳定性。PR 与外骨骼机器人和动力 AO 相反, 它是不可穿戴的。PR 对内翻-外翻和背屈-跖屈运动具有良好的控制。PR 适用于肢体残疾或行动不便的患者的康复, 其能有效改善关节僵硬, 并有利于患者的 ROM 和踝关节本体感觉恢复。尽管这些设备可以用于收集信息以评估患者的康复进展, 但它们仍是昂贵的设备, 需要专家对其进行管理, 所以要真正投入到临床使用还有很长一段路要走。

4 下肢康复机器人的优缺点

下肢康复机器人在功能康复训练方面优势明显, (1)其可以筛选出高精度康复指标以评估康复疗效。

(2)其可以提供高强度的主动康复训练提高康复效果。(3)康复模式可选择且有针对性, 能适应不同疾病的康复人群。(4)下肢康复机器人联合其他治疗方式后在中枢系统、骨骼肌肉系统、视觉系统、本体感觉系统、前庭系统及认知系统均能取得积极的康复疗效。此外其在经济成本方面、人力成本方面也有明显优势。但另一方面下肢康复机器人缺点在于其型号多样, 这些装置中的大多数型号仍处于实验阶段, 真正用于临床仍受到限制, 此外由于缺乏标准化的评估体系以评价下肢康复机器人的康复效率, 这意味着最好的治疗方法仍有待确定。下肢康复机器人的实用性、安全性和功能性方面仍存在诸多现实问题。

5 不同下肢康复机器人训练方面的特点

站立式步行康复机器人在康复训练中全身都能参与训练, 在肌力及肌张力恢复训练上有明显的优势。训练过程中联合其他康复设备后, 其中枢系统、骨骼肌肉系统、视觉系统、本体感觉系统、前庭系统及认知系统都能得到积极改善, 值得临床推广。

坐卧式康复机器人虽然在安全性上优于站立式步行康复机器人, 但由于坐在轮椅或座椅上驱动双下肢进行康复训练, 患者上肢及躯干参与康复训练较少, 患者头部、上肢、躯干在训练中未得到充分的康复训练, 所以康复效果较站立式步行康复机器人有缺陷, 需要进一步相关临床证据印证。运用坐卧式康复机器人时应充分考虑患者一般情况, 康复疗效及患者预期康复效果, 可作为一种折中的选择。

6 总结与展望

随着虚拟现实、脑电、肌电技术与机器人技术的不断发展, 人工智能及人机交互为代表的技术取得突破, 后期的临床研究中一方面应该针对患者的差异性多方面考虑(例如: 年龄、基础状态、病情、家庭情况等), 另一方面也应该对下肢康复机器人设备的实用性进行升级, 加之运用大数据、人工智能等先进技术可更快捷地完成个性化康复方案的设计。此外, 临床工作人员应加强相关康复知识的学习, 从机器参数设置到患者适应性分析, 从生物力学研究到实际临床应用都应应是下一步改进的方向。重点关注下肢康复机器人的疗效评价指标、机器人智能化控制、成本控制、模块化设计、人工智能辅助、标准化康复方案、个性化处方、康复训练方法、机器人性能及可靠性等方面。相信随着下肢康复机器人技术的不断发展, 下肢康复机器人将更可靠、简便、稳定、高效的广泛运用于临床骨科康复, 其在未来会具有更加广泛的临床应用前景。

参考文献

- [1] 国家统计局. 年度数据: 人口年龄结构[EB/OL]. [2023-08-02]. <https://data.stats.gov.cn>.

- [2] KUJALA U M, HAUTASAARI P, VÄHÄY-PYÄ H, et al. Chronic diseases and objectively monitored physical activity profile among aged individuals—a cross-sectional twin cohort study [J]. *Ann Med*, 2019, 51(1): 78-87.
- [3] 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.
- [4] BHARDWAJ S, KHAN A A, MUZAMMIL M. Lower limb rehabilitation robotics: the current understanding and technology[J]. *Work*, 2021, 69(3): 775-793.
- [5] KOTANI N, MORISHITA T, SAITA K, et al. Feasibility of supplemental robot-assisted knee flexion exercise following total knee arthroplasty[J]. *J Back Musculoskelet Rehabil*, 2020, 33(3): 413-421.
- [6] 姚嘉欣, 李哲. 下肢康复机器人在脊髓损伤康复中的应用[J]. *中国现代医生*, 2020, 58(35): 187-192.
- [7] 马微波, 刘悦文, 郭琪, 等. 老年人平衡功能障碍的多成因跌倒分析[J]. *中国康复*, 2020, 35(10): 547-551.
- [8] ZHAO B L, LI W T, ZHOU X H, et al. Effective robotic assistive pattern of treadmill training for spinal cord injury in a rat model[J]. *Exp Ther Med*, 2018, 15(4): 3283-3294.
- [9] GUERTIN P A. Preclinical evidence supporting the clinical development of central pattern generator-modulating therapies for chronic spinal cord-injured patients[J]. *Front Hum Neurosci*, 2014, 8: 272.
- [10] VAN KAMMEN K, BOONSTRA A M, VAN DER WOUDE L H V, et al. Differences in muscle activity and temporal step parameters between Lokomat guided walking and treadmill walking in post-stroke hemiparetic patients and healthy walkers[J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2017, 14(1): 32.
- [11] 赵俊, 邹任玲, 徐秀林, 等. 基于减重步行训练的下肢康复机器人结构设计与分析[J]. *生物医学工程学进展*, 2014, 35(4): 187-190.
- [12] 袁博, 李开南, 贾子善. 不同模式平衡障碍康复机器人训练老年全髋关节置换后的效果比较[J]. *中国组织工程研究*, 2022, 26(36): 5826-5830.
- [13] QUINTERO H A, FARRIS R J, HARTIGAN C, et al. A Powered lower limb orthosis for providing legged mobility in paraplegic individuals [J]. *Top Spinal Cord Inj Rehabil*, 2011, 17(1): 25-33.
- [14] FARRIS R J, QUINTERO H A, GOLDFARB M. Preliminary evaluation of a powered lower limb orthosis to aid walking in paraplegic individuals[J]. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*, 2011, 19(6): 652-659.
- [15] CHEN B, ZHONG C H, ZHAO X, et al. Reference joint trajectories generation of CUHK-EXO exoskeleton for system balance in walking assistance [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 33809-33821.
- [16] CHEN B, ZHONG C H, MA H, et al. Sit-to-stand and stand-to-sit assistance for paraplegic patients with CUHK-EXO exoskeleton[J]. *Robotica Int J Inform*, 2018, 36(4): 535-551.
- [17] HE Y, LI N, WANG C, et al. Development of a novel autonomous lower extremity exoskeleton robot for walking assistance[J]. *Front Inform Technol EI*, 2019, 20(3): 318-329.
- [18] DZAHIR M A M, YAMAMOTO S. Recent trends in lower-limb robotic rehabilitation orthosis: control scheme and strategy for pneumatic muscle actuated gait trainers [J]. *Robotics*, 2014, 3(2): 120-148.
- [19] 张军, 邱智, 潘冠文, 等. MOTOMed 智能运动训练对脑卒中偏瘫患者步行能力的影响[J]. *实用临床医学*, 2014, 15(3): 5-7.
- [20] RODRÍGUEZ-FERNÁNDEZ A, LOBO-PRAT J, FONT-LLAGUNES J M. Systematic review on wearable lower-limb exoskeletons for gait training in neuromuscular impairments [J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2021, 18(1): 22.
- [21] 江世红. 一种多功能下肢康复机器人的设计与研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2016.
- [22] 高红凯. 下肢康复机器人的设计与研究[D]. 泉州: 华侨大学, 2016.
- [23] 张英泽. 成人髋部骨折指南解读[J]. *中华外科杂志*, 2015, 53(1): 57-62.
- [24] 刘强. 骨质疏松症与骨质疏松性骨折[J]. *中华创伤杂志*, 2015, 31(9): 793-795.
- [25] VERONESE N, MAGGI S. Epidemiology and social costs of hip fracture[J]. *Injury*, 2018, 49(8): 1458-1460.
- [26] 张培训, 许庭珉. 老年骨质疏松性髋部骨折的围术期处理策略[J]. *中国骨与关节杂志*, 2020, 9(6): 401-403.
- [27] LO J C, SRINIVASAN S, CHANDRA M, et al. Trends in mortality following hip fracture

- in older women[J]. *Am J Manag Care*, 2015, 21(3):e206-214.
- [28] SETOGUCHI D, KINOSHITA K, KAMADA S, et al. Hybrid assistive limb improves restricted hip extension after total hip arthroplasty[J]. *Assist Technol*, 2022, 34(1): 112-120.
- [29] FANG T, CAO W, CHEN C, et al. A soft exosuit for hip extension assistance of the elderly[J]. *Technol Health Care*, 2021, 29(4): 837-841.
- [30] 冯昱宁, 李开南, 贾子善. 平衡障碍康复机器人在老年下肢骨折患者术后康复中的应用效果研究[J]. *中国全科医学*, 2021, 24(25): 3233-3237.
- [31] 王士允. 基于表面肌电信号的膝关节康复机器人控制技术[D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
- [32] COLLINS J E, ROME B N, DAIGLE M E, et al. A comparison of patient-reported and measured range of motion in a cohort of total knee arthroplasty patients[J]. *J Arthroplasty*, 2014, 29(7): 1378-1382.
- [33] HARVEY L A, BROSSEAU L, HERBERT R D. Continuous passive motion following total knee arthroplasty in people with arthritis[J]. *Cochrane Database Syst Rev*, 2014, 2014(2): CD004260.
- [34] HERBOLD J A, BONISTALL K, BLACKBURN M, et al. Randomized controlled trial of the effectiveness of continuous passive motion after total knee replacement[J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2014, 95(7): 1240-1245.
- [35] BOESE C K, WEIS M, PHILLIPS T, et al. The efficacy of continuous passive motion after total knee arthroplasty: a comparison of three protocols[J]. *J Arthroplasty*, 2014, 29(6): 1158-1162.
- [36] 李建华, 吴涛, 边仁秀, 等. 康复机器人辅助步行训练对全膝关节置换术后患者功能恢复的影响[J]. *中华物理医学与康复杂志*, 2012, 34(11): 806-809.
- [37] TORREALBA R R, UDELMAN S B, FONSECA-ROJAS E D. Design of variable impedance actuator for knee joint of a portable human gait rehabilitation exoskeleton[J]. *Mechan Mach Theo*, 2017, 116: 248-261.
- [38] MCGIBBON C A, SEXTON A, JAYARAMAN A, et al. Evaluation of the Keeogo exoskeleton for assisting ambulatory activities in people with multiple sclerosis: an open-label, randomized, cross-over trial[J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2018, 15(1): 117.
- [39] 蔡立柏, 刘延锦, 刘阳阳, 等. 下肢康复机器人的应用对全膝关节置换术患者康复的影响[J]. *护理学杂志*, 2022, 37(5): 5-9.
- [40] RENFREW L M, PAUL L, MCFADYEN A, et al. The clinical- and cost-effectiveness of functional electrical stimulation and ankle-foot orthoses for foot drop in Multiple Sclerosis: a multicentre randomized trial[J]. *Clin Rehabil*, 2019, 33(7): 1150-1162.
- [41] KHALID Y M, GOUWANDA D, PARASURAMAN S. A review on the mechanical design elements of ankle rehabilitation robot[J]. *Proc Inst Mech Eng H*, 2015, 229(6): 452-463.
- [42] GORDON K E, SAWICKI G S, FERRIS D P. Mechanical performance of artificial pneumatic muscles to power an ankle-foot orthosis[J]. *J Biomech*, 2006, 39(10): 1832-1841.
- [43] THALMAN C M, HSU J, SNYDER L, et al. Design of a soft ankle-foot orthosis exosuit for foot drop assistance[EB/OL]. [2023-08-02]. <https://www.zhangqiaokeyan.com/patent-detail/06130404266598.html>
- [44] THIELE F, SCHUHMACHER S, SCHWALLER C, et al. Restrictions in the ankle sagittal- and frontal plane range of movement during simulated walking with different types of orthoses[J]. *J Funct Morphol Kinesiol*, 2018, 3(2): 21.
- [45] RAFFALT P C, CHRYSANTHOU M, DUDA G N, et al. Dynamics of postural control in individuals with ankle instability: effect of visual input and orthotic use[J]. *Comput Biol Med*, 2019, 110: 120-126.

(收稿日期: 2023-08-18 修回日期: 2024-01-28)

(编辑: 姚雪)