

·综述·

## 下肢外骨骼康复机器人的发展和应用

刘瑞平<sup>1,2</sup>, 欧阳钧<sup>2</sup>

(1. 中山大学医学院解剖学教研室, 广东 广州 510080; 2. 南方医科大学人体解剖学教研室, 广东省数字医学与生物力学重点实验室, 广东 广州 510515)

**摘要:**随着社会老龄化程度不断加深, 下肢功能障碍的患者越来越多, 患者运动能力的康复治疗越来越重要。从上世纪80年代开始, 面向下肢的外骨骼康复机器人逐步应用于运动障碍患者的康复治疗, 尤其是脑卒中等神经疾病导致的运动功能障碍。面向下肢的外骨骼机器人是一种可穿戴、非线性的复杂机械装置, 有着广泛的研究与应用价值。本综述根据外骨骼康复机器人治疗部位分三个方面阐述了面向下肢的外骨骼康复机器人的研究现状, 临床应用以及面临的挑战, 并在此基础上展望了面向下肢的外骨骼康复机器人的发展趋势。

**关键词:** 下肢; 外骨骼机器人; 康复; 应用

中图分类号: R496

文献标志码: A

文章编号: 1672-3554(2023)02-0354-07

DOI: 10.13471/j.cnki.j.sun.yat-sen.univ(med.sci).2023.0222

### Development and Application of Lower Limb Exoskeleton Rehabilitation Robot

LIU Rui-ping<sup>1,2</sup>, OUYANG Jun<sup>2</sup>

(1. Department of Anatomy, Zhongshan School of Medicine, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510080, China; 2. Department of Anatomy, School of Basic Medicine, Southern Medical University, Guangdong Provincial Key Laboratory of Digital Medical Biomechanics, Guangzhou 510515, China)

Correspondence to: OUYANG Jun; E-mail: jouyang@126.com

**Abstract:** With the deepening of the aging of society, there are more and more patients with motor dysfunction of lower limb, and rehabilitation therapy for these patients is becoming more and more important. Since the 1980s, exoskeleton robots for lower-limb rehabilitation have been applied to the rehabilitation for patient with dyskinesia, especially those with dyskinesia caused by neurological diseases such as stroke. These exoskeleton robots are wearable, nonlinear and complex mechanical devices, which deserve to be studied and widely applied. In this review, the research status, clinical application and challenges of exoskeleton robots for lower-limb rehabilitation are described in three aspects according to the difference of the therapeutic sites of exoskeleton rehabilitation robots, and on the basis, the development trend of exoskeleton robots for lower-limb rehabilitation is prospected.

**Key words:** lower limb; exoskeleton robot; rehabilitation; application

[J SUN Yat-sen Univ (Med Sci), 2023, 44(2): 354-360]

随着社会老年人群体不断扩大, 医疗资源匮乏的问题日益严重, 老年人群体主要面临的问题包括行动不便, 衰老和疾病等都会影响身体机能。骨关

节炎等肌肉骨骼疾病, 偏瘫等神经系统疾病, 心血管病等都会导致运动功能障碍<sup>[1]</sup>。在医疗手段短缺、患者增多以及人力成本提高等日益严重问题的

收稿日期: 2022-11-03

基金项目: 国家自然科学基金(32101054)

作者简介: 刘瑞平, 硕士生, 研究方向: 生物力学, E-mail: 2313452520@qq.com; 欧阳钧, 通信作者, 教授, 博士生导师, E-mail: jouyang@126.com

挑战下,医疗康复系统需要寻求新的治疗手段<sup>[2]</sup>。目前,计算机科学、生物信息学、机械等领域的技术正被应用于医疗康复过程中,以弥补医疗康复系统在诊断和治疗等方面的不足。对于老年人行动不便的问题,物理治疗<sup>[3]</sup>和辅助技术<sup>[4]</sup>是主要的治疗手段。物理治疗主要通过运动和训练实现治疗目的。King等<sup>[5]</sup>发现通过物理锻炼可以减少和延缓帕金森病患者的行动障碍。辅助技术被用于提高和维护人的功能能力,提升使用者的独立性<sup>[6]</sup>。Agree等<sup>[7]</sup>发现辅助技术的使用能够减少对支持服务的需求、降低康复成本。现阶段的研究方向集中于新的物理治疗和辅助技术的研究,而面向下肢的外骨骼康复机器人能为患者提供康复训练和行动辅助,从而缩短患者的康复时间、降低康复成本、改善康复过程和康复结果。此外,它能够量化患者的运动状态,对患者的身体状况形成基于数据的客观评估。本文首先介绍了下肢外骨骼康复机器人的发展历程和工作原理,其次从治疗型和辅助型两种类型的下肢外骨骼康复机器人介绍了下肢外骨骼康复机器人的研究进展,然后从踝关节外骨骼康复机器人、膝关节外骨骼康复机器人和髋关节外骨骼康复机器人三个方面介绍了面向下肢的外骨骼康复机器人临床应用的研究进展,并提出其未来的发展趋势。

## 1 下肢外骨骼康复机器人的发展和工作原理

### 1.1 发展历程

最初的下肢外骨骼机器人主要被应用于军事领域,1890年俄罗斯发明了世界上第一款下肢助力外骨骼装置,从此世界各国逐渐开始加强对下肢外骨骼装置的研究<sup>[8]</sup>。1935年美国研制出辅助下肢运动障碍患者行走的装置<sup>[9]</sup>,此后,下肢外骨骼机器人逐渐被应用于医学康复领域。并且根据下肢外骨骼机器人不同的应用目的发展出了如Lokomat的治疗型机器人和HAL系列的辅助型机器人。还有针对不同治疗部位的下肢外骨骼机器人也相继问世,如踝关节机器人等。此外,根据下肢外骨骼机器人笨重、穿戴舒适度低等问题,问世了如Soft Exosuit柔性气动外骨骼机器人的轻量型机器人。具体下肢外骨骼康复机器人的发展历程如

图1所示。

### 1.2 工作原理

下肢外骨骼康复机器人是多系统结构,如图2所示。该机器人是通过在各个部位安装的传感器获得角度、方向、能量等数据,并将这些数据传输到控制器中,经过控制器分析、处理,然后发出机器人的动作进行调节的命令,最后执行机构完成与使用者的运动动作。

## 2 下肢外骨骼机器人的分类及其研究现状

伴随机器人技术的发展,下肢外骨骼康复机器人在运动功能障碍患者的康复治疗中发挥的作用日益显著,但大部分还在处于实验室研究阶段,投放市场还需要进一步研究。现阶段主要有两种下肢外骨骼机器人应用于临床中,治疗型机器人是为患者提供步态校正等的康复治疗,而辅助型机器人是帮助患者进行运动。

### 2.1 治疗型下肢外骨骼机器人

治疗型机器人的研究开始于20世纪80年代<sup>[10]</sup>。治疗型机器人经历三个发展阶段,最先出现的是矫形器,矫形器是通过给人体施加外力来改变人体神经等系统功能特性的机械装置,矫形器主要应用于四肢运动功能障碍的康复治疗中<sup>[11]</sup>;之后关节康复训练器应运而生,关节康复训练器是辅助人体运动,促进软骨组织的代谢,提高患者运动能力的设备<sup>[12]</sup>;目前,治疗型机器人成为主旋律,治疗机器人是为有运动障碍患者提供运动训练的智能设备。

Hocoma公司推出的Lokomat是目前应用最广泛的治疗型机器人。它能针对不同的患者设置不同的参数,以满足不同的治疗要求,主要治疗目标是步态异常的患者,能提高患者的行动能力<sup>[13]</sup>。林芳堃等<sup>[14]</sup>发现下肢外骨骼康复机器人能够促进脑卒中患者下肢功能的恢复,但Kammen等<sup>[13]</sup>发现Lokomat对脑卒中患者的肌肉活动和步态对称性方面没有治疗效果。LokoHelp是一款德国公司设计的跑步机式步态训练机器人,能够帮助患者进行基础步态和不同坡度的下坡运动训练,提高患者下肢运动能力<sup>[15]</sup>。有临床试验显示,LokoHelp能够明显提升患者的步行距离,减少治疗人员,提高患者的

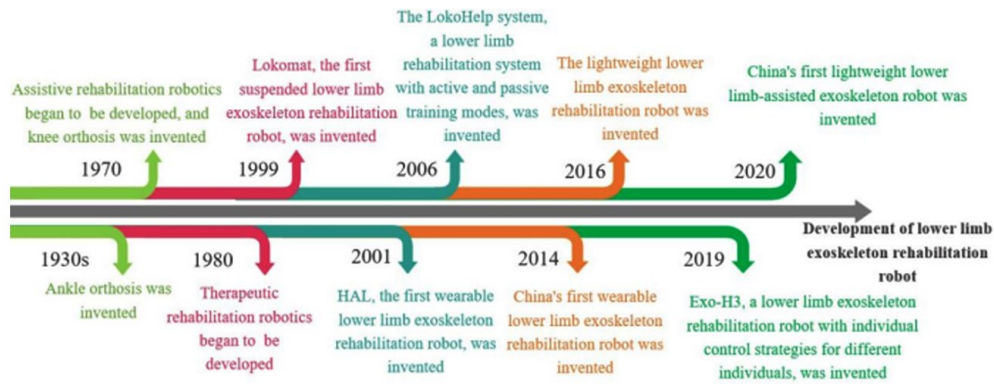


图1 下肢外骨骼康复机器人发展历程

Fig. 1 Development of lower limb exoskeleton rehabilitation robots

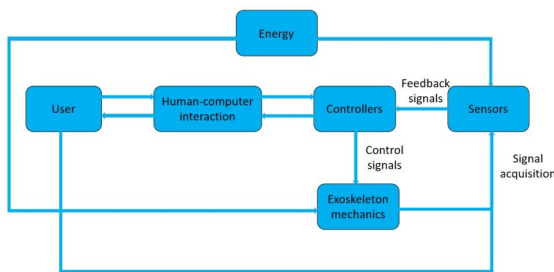


图2 下肢外骨骼康复机器人工作原理

Fig. 2 Principle of lower extremity exoskeleton rehabilitation robot

舒适度,但并不能提升患者的行走速度,只适用于特定步态轨迹,普适性较低<sup>[16]</sup>。Ekso是一款Ekso Bionics 机器人公司设计的步态训练机器人,能够帮助患者维持平衡,辅助患者在地面上进行步态训练<sup>[17]</sup>。Miller等<sup>[18]</sup>发现Ekso能够延缓截瘫患者骨密度的降低速度、促进肌肉生长和血液循环,改善消化功能和二便功能。

## 2.2 辅助型下肢外骨骼机器人

自20世纪70年代中期辅助型康复机器人技术开始发展,最初出现的是通过指令控制电动手臂在工作台上完成工作的工作台式机器人<sup>[19]</sup>。90年代开始许多国家都在康复机器人领域加大研究投入,康复机器人技术快速发展,具有路径规划和导航等功能的智能轮椅<sup>[20]</sup>和为孤寡老年人设计的辅助陪伴机器人<sup>[21]</sup>等都相继出现。

Cyberdyne公司推出的HAL系列是被广泛使用的辅助康复机器人,能够为患者提供实时按需助力,延长患者行走的时间,提高患者的步行能力。Watanabe等<sup>[22]</sup>发现单侧HAL能够明显改善患者下肢行走的对称性和身体的平衡性,但患者可能会出

现了压疮等不良反应。ReWalk是一款能够帮助上肢功能完好的患者站立、行走的下肢外骨骼康复机器人,能提升患者的步行能力<sup>[23]</sup>。有研究表明,ReWalk能够辅助脊髓损伤的轮椅使用患者实现独立行走,缓解患者的肌肉痉挛<sup>[24]</sup>。Indego是辅助患者直立行走的下肢外骨骼康复机器人,主要应用于患者的站立训练和行走的康复治疗过程中<sup>[25]</sup>。Tefertiller等<sup>[26]</sup>发现Indego能够延长患者的步行距离和步行时间,同时也能提升患者的步行速度。

治疗型下肢外骨骼机器人广泛应用于脑卒中患者的康复训练中,Carpino等<sup>[27]</sup>发现可穿戴下肢机器人在恢复患者独立步行能力方面效果显著优于传统方法,但在恢复患者步行速度方面与传统方法无明显差异。辅助型下肢外骨骼机器人广泛用于助力患者进行日常活动,能够减轻患者在运动过程中的负担。但其提供的行走方式和行走速度与人类的正常状态并不相同,而且长时间使用可能导致患者过度依赖机器人,从而影响患者离开机器人后的自主运动表现<sup>[28]</sup>。现阶段研究显示,下肢外骨骼机器人还存在治疗效果和治疗范围上还不能满足许多患者的需求,患者会有不良反应等问题,但下肢外骨骼机器人能够使部分轮椅使用者重新站立、行走,提高患者的治疗效果,帮助患者重获信心,在患者的康复过程中发挥的作用也愈发重要。

## 3 临床应用

### 3.1 踝关节康复

踝关节是人体最复杂的关节之一,在日常运动中起着非常重要的作用,但踝关节损伤发生率非常

高<sup>[29]</sup>。踝关节损伤治疗时期进行康复训练可以加快患者康复速度,降低踝关节再损伤的发生率<sup>[30]</sup>。踝关节外骨骼康复机器人在康复锻炼中发挥着重要作用,得到研究人员的广泛关注。

20世纪30年代踝关节矫形器就已出现,其实际上是一种外骨骼<sup>[31]</sup>。1989年Eng等<sup>[32]</sup>开发了基于三维步态技术的踝关节矫形器,经过研究表明,它能改善患者步态周期的生物力学特性。2006年Gordon等<sup>[33]</sup>开发了一款由气动肌肉驱动的踝关节矫形器,经过测量发现该矫形器能够辅助患者进行跖屈和背屈训练,但这种矫形器在踝关节康复中的效果并不显著。2007年Ekkelenkamp<sup>[34]</sup>报告了特别针对踝关节的康复进行改进设计的外骨骼机器人LOPES,LOPES对治疗脑卒中致残患者有很大的潜力。2019年Thalman等<sup>[35]</sup>报道了一种治疗足下垂患者步态的柔性踝关节矫形器,实现了踝关节矫形器的柔性化。2021年王同等<sup>[36]</sup>提出一种针对偏瘫患者的踝关节康复机器人,该机器人能够模拟治疗师的康复手法,辅助患者进行踝关节康复训练。

Sukal-Moulton等<sup>[37]</sup>发现踝关节机器人能够有效改善脑瘫患儿的运动能力。Thiele等<sup>[38]</sup>发现VA-COankle TM型矫形器对足踝康复训练的效果更好。Petrucci等<sup>[39]</sup>发现踝关节外骨骼辅助帕金森病导致冻结步态的患者进行步态训练有明显效果。Raffalt等<sup>[40]</sup>发现使用矫形器能够明显改善患者踝关节不稳的问题。Berenpas等<sup>[41]</sup>发现使用踝关节矫形器并进行植入式腓侧功能电刺激的脑卒中后足下垂患者有良好的康复效果。

### 3.2 膝关节康复

膝关节运动障碍患者在肢体运动障碍患者中占比最多,这为膝关节外骨骼康复机器人的广泛使用提供了契机<sup>[42]</sup>。膝关节康复机器人能够帮助膝关节功能障碍患者进行康复训练或辅助运动,其具有响应速度快,动作精度高的优势,有取代传统康复治疗的趋势。目前仅针对膝关节外骨骼康复机器人的研究机构并不多,但膝关节康复机器人的内在实际需求和现实意义,吸引研究人员的纷纷开展相关研究。

1970年Sameri等<sup>[43]</sup>报道了一种膝关节康复矫形器,通过临床试验表明,该矫形器可以将膝关节最大有效扭矩放大34%,此后,膝关节康复机器人逐渐被设计出来。2010年刘洪涛<sup>[44]</sup>设计了一款能进行多关节和单一关节的康复训练的下肢外骨骼

康复机器人,用于截瘫患者的康复训练中。该机器人能帮助患者提高膝关节等关节的活动能力,防止肌肉萎缩。2017年Shihomi等<sup>[45]</sup>设计了一款适用于脑卒中患者的康复训练的膝关节外骨骼康复机器人Robot-KAFO,经试验表明,Robot-KAFO能够有效改善患者膝关节的步态性能和肌肉状态。同年Torrealba等<sup>[46]</sup>设计了一款用于患者步态训练膝关节外骨骼康复机器人BAFSA,以辅助患者恢复受损膝关节的正常功能。Keeogo是一款能根据患者身体的实际需要提供助力的膝关节外骨骼机器人,McGibbond等<sup>[47]</sup>研究表明该机器人能够在家和诊所安全使用,并能改善患者的膝关节机能。

### 3.3 髌关节康复

髌关节是维持人体运动的中最重要的关节之一,具有支撑上半身和参与下半身运动的功能<sup>[48]</sup>。近年来,外骨骼康复机器人成为了世界研究人员的关注热点,而髌关节作为最重要的关节之一,髌关节外骨骼机器人的研究也被研究人员广泛关注。

2012年梁文渊<sup>[49]</sup>设计了一款辅助髌关节运动机能减弱的患者正常运动的并联式髌关节康复机器人。2015年Giovacchini等<sup>[50]</sup>设计了一款辅助髌关节运动的轻质髌关节矫形器,可辅助患者进行上下楼等日常活动。2017年Karavas等<sup>[51]</sup>报道了一种辅助髌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。2021年Mogharabi等<sup>[52]</sup>报道了一种髌关节康复机器人HEXA-I,能够用于脑卒中导致运动障碍患者的康复治疗中,经临床试验表明,HEXA-I能帮助患者实现对称的行走模式,并根据自己的轨迹调整患侧步态。

现阶段的踝关节、膝关节和髌关节的康复机器人在治疗效果上相比传统物理治疗并无显著优势,临床研究还不充分,尤其是膝关节和髌关节康复机器人的临床研究,尚不足以完全取代传统物理治疗。但此类机器人可以与传统物理疗法相结合,能够提升康复治疗效果,减轻康复工作者负担,能够客观评估患者的康复治疗效果,在康复治疗中扮演的角色也愈发重要。

## 4 展望

面向下肢的外骨骼康复机器人技术是多种高新技术融合形成的产品,能帮助运动功能障碍患者

进行康复训练,改善身体机能。目前,下肢外骨骼康复机器人和踝关节康复机器人在临床应用较多,膝关节和髌关节康复机器人的临床应用研究较少,虽然现在面向下肢的外骨骼康复机器人还不能完全取代传统康复治疗方法,但其独特的优越性,未来会成为康复医疗过程中的主角。

对于面向下肢的外骨骼康复机器人,未来的发展趋势有以下三点:

① 康复过程规范化。目前,患者在使用下肢外骨骼康复机器人时没有根据患者实际情况制定合理的使用策略,导致患者在使用时会出现压疮,甚至产生依赖,导致患者病情恶化。患者在使用面向下肢的外骨骼康复机器人进行康复治疗时需要根据患者情况设定使用流程、使用时间等标准规范,提高治疗效果,缩短治疗时间,防止患者对机器人产生依赖。

② 治疗范围扩大化。目前下肢外骨骼康复机器人只在少数疾病(如脑卒中)的康复过程中有显著效果,但在其他疾病康复过程中效果并不显著或尚不明确。未来可以尝试应用于其他疾病的康复治疗过程中,还可以让机器人辅助患者进行更多运动时的复杂动作,让下肢外骨骼康复机器人广泛应用于康复治疗中。此外,还要改进下肢外骨骼康复机器人的控制系统,让其提供的康复训练(如步态训练)尽可能地贴近健康人的动作。

③ 治疗目标精确化。现在广泛应用的下肢康复机器人不能完成实时根据下肢每个关节实际情况制定锻炼策略。未来可以改进下肢的外骨骼康复机器人,让其针对患者不同的身体部位设定参数,做到区别对待,精确治疗。这可以提高治疗效果,缩短康复时间,减少经济成本。

#### 参考文献

- [1] Kujala UM, Hautasaari P, Vähä-Ypyä, et al. Chronic diseases and objectively monitored physical activity profile among aged individuals - a cross-sectional twin cohort study [J]. *Annals of Medicine*, 2019, 51(1): 1-25.
- [2] 廖旺,唐静仪,雷鸣,等.粤港澳大湾区失智症友好社区建设专家共识[J]. *中国神经精神疾病杂志*, 2022, 48(4): 193-205.  
Liao W, Tang JY, Lei M, et al. Expert consensus on the construction of dementia-friendly communities in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [J]. *Chin J Nerv Ment Dis*, 2022, 48(4): 193-205.
- [3] Daniels R, Rossum EV, Witte LD, et al. Frailty in older age: concepts and relevance for occupational and physical therapy [J]. *Physical & Occupational Therapy in Geriatrics*, 2009, 27(2): 81-95.
- [4] Cook AM, Polgar JM, Hussey SM. Cook & Hussey's assistive technologies [M]. Mosby/Elsevier, 2008: 23-24.
- [5] King LA, Horak FB. Delaying mobility disability in people with Parkinson disease using a sensorimotor agility exercise program [J]. *Phys Ther*, 2009, 89(4): 384-393.
- [6] Cook AM. Ethical issues related to the use/non-use of assistive technologies [J]. *Developmental Disabilities Bulletin*, 2009, 37(1): 127-152.
- [7] Agree EM, Freedman VA. A comparison of assistive technology and personal care in alleviating disability and unmet need [J]. *Gerontologist*, 2003(3): 335-344.
- [8] 李龙飞,朱凌云,苟向锋.可穿戴下肢外骨骼康复机器人研究现状与发展趋势[J]. *医疗卫生装备*, 2019, 40(12): 89-97.  
Li LF, Zhu LY, Gou XF. Current status and development trend of wearable lower-limb exoskeleton rehabilitation robot [J]. *Chin Med Equipm J*, 2019, 40(12): 89-97.
- [9] Formalskii A, Shneider A. Book reviews: biped locomotion (dynamics, stability, control and application) [J]. *Intern J Robot Res*, 1992, 11(4): 396.
- [10] 孙建东,金德闻.一种下肢被动运动康复训练器 [J]. *中国康复医学杂志*, 2001, 16(5): 298-299.  
Sun JD, Jin DW. A training device for lower limbs passive exercise [J]. *Chin J Rehabil Med*, 2001, 16(5): 298-299.
- [11] 李高峰,方新.矫形器产品的功能考量[J]. *中国组织工程研究*, 2006, 10(37): 134-135.  
Li GF, Fang X. Consideration of the function of orthoses [J]. *Chin J Clin Rehabil*, 2006, 010(037): 134-135.
- [12] 沈靖南,黄承达.关节外科中的新概念——持续被动运动[J]. *国外医学:创伤与外科基本问题分册*, 1991, 12(3): 152-155.  
Shen JN, Huang CD. A new concept in joint surgery —— continuous passive motion [J]. *Foreign Med-*

- icine: Basic Problems in Trauma and Surgery, 1991, 12(3): 152-155.
- [13] Van Kammen K, Boonstra AM, WlHVVan d, et al. Lokomat guided gait in hemiparetic stroke patients: the effects of training parameters on muscle activity and temporal symmetry[J]. Disabil Rehabil, 2019; 1-9.
- [14] 林芳堃, 李仰军, 张银亮, 等. 下肢康复机器人对卒中中偏瘫患者下肢功能修复的影响[J]. 中国医疗器械信息, 2019, 25(20): 85-86.  
Lin FK, Li YJ, Zhang YL, et al. Effect of lower limb rehabilitation robot on lower limb functional repair of stroke patients with hemiplegia[J]. Chin Med Device Inform, 2019, 25(20): 85-86.
- [15] Freivogel S, Mehrholz J, Husak-Sotomayor T, et al. Gait training with the newly developed 'LokoHelp'-system is feasible for non-ambulatory patients after stroke, spinal cord and brain injury. A feasibility study. [J]. Brain injury : BI, 2008, 22 (7-8) : 625-32.
- [16] Freivogel S, Schmalohr D, Mehrholz J. Improved walking ability and reduced therapeutic stress with an electromechanical gait device[J]. J Rehabil Med, 2009, 41(9): 734-739.
- [17] Strausser KA, Swift TA, Zoss AB, et al. Prototype medical exoskeleton for paraplegic mobility: first experimental results [C]. ASME 2010 Dynamic Systems and Control Conference, 2010: 453-458.
- [18] Miller LE. Clinical effectiveness and safety of powered exoskeleton-assisted walking in patients with spinal cord injury: systematic review with meta-analysis[J]. Med Devices, 2016, 9: 455-466.
- [19] 孙立宁, 何富君, 杜志江, 等. 辅助型康复机器人技术的研究与发展[J]. 机器人, 2006, 28(3): 6.  
Sun LN, He FJ, Du ZJ, et al. Research and development of assistive rehabilitation robotics [J]. Robot, 2006, 28(3): 6.
- [20] 何清华, 黄素平, 黄志雄. 智能轮椅的研究现状和发展趋势[J]. 机器人技术与应用, 2003(2): 5.  
He QH, Huang SP, Huang ZX. Research status and development trend of intelligent wheelchair[J]. Robot Technique and Application, 2003(2): 5
- [21] 李晓杰, 梁健. 基于INPD与KE的老年人辅助陪伴机器人造型设计[J]. 包装工程, 2020, 41(24): 70-78.  
Li XJ, Liang J. Design of assisted companion robot for the elderly based on INPD and KE[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(24): 70-78.
- [22] Watanabe H, Tanaka N, Inuta T, et al. Locomotion improvement using a hybrid assistive limb in recovery phase stroke patients: a randomized controlled pilot study [J]. Arch Phys Med Rehabil, 2014, 95(11) : 2006-2012.
- [23] Fineberg DB, Asselin P, Harel NY, et al. Vertical ground reaction force-based analysis of powered exoskeleton-assisted walking in persons with motor-complete paraplegia [J]. J Spinal Cord Med, 2013, 36 (4): 313-321.
- [24] Yang A, Asselin P, Knezevic S, et al. Assessment of in-hospital walking velocity and level of assistance in a powered exoskeleton in persons with spinal cord injury [J]. Top Spinal Cord Inj Rehabil, 2015, 21 (2) : 100-109.
- [25] Jyrkoski T, Merilampi S, Puustinen J, et al. Over-ground robotic lower limb exoskeleton in neurological gait rehabilitation: user experiences and effects on walking ability [J]. Technol Disa, 2020, 33 (7) : 1-11.
- [26] Tefertiller C, Hays K, Jones J, et al. Initial outcomes from a multicenter study utilizing the indigo powered exoskeleton in spinal cord injury [J]. Top Spinal Cord Inj Rehabil, 2018, 24(1): 78.
- [27] Carpino G, Pezzola A, Urbano M, et al. Assessing effectiveness and costs in robot-mediated lower limbs rehabilitation: a meta-analysis and state of the art [J]. Healthc Eng, 2018, 2018: 7492024.
- [28] Bishop L, Khan M, Martelli D, et al. Exploration of two training paradigms using forced induced weight shifting with the tethered pelvic assist device to reduce asymmetry in individuals after stroke: case reports [J]. Am J Phys Med Rehabil, 2017, 96 (10 Suppl 1): S135-S140.
- [29] 张小俊, 刘更谦, 何春燕, 等. 基于虚拟现实的踝关节康复机器人的综述[J]. 机电产品开发与创新, 2006, 19(1): 3.  
Zhang XJ, Liu GQ, He CY, et al. A review of ankle rehabilitation robots based on virtual reality [J]. Developm Innovat Machin Elect Prod, 2006, 19(1): 3.
- [30] Girone M J, Burdea GC, Bouzit M. Rutgers ankle orthopedic rehabilitation interface [J]. Asme Dynamic Systems & Control Division Dsc, 1999: 305-312.
- [31] Hussain S, Jamwal PK, Vliet PV, et al. Robot assisted ankle neuro-rehabilitation: state of the art and future challenges [J]. Expert Review of Neurotherapeutics, 2020, 21(6): 111-121.
- [32] Eng JJ, Pierrynowski MR. Effect of foot orthotics on the kinematics of the knee joint [J]. J Biomechan, 1989, 22(10): 1007.

- [33] Gordon KE, Sawicki GS, Ferris DP. Mechanical performance of artificial pneumatic muscles to power an ankle-foot orthosis[J]. *J Biomechan*, 2006, 39(10): 1832-1841.
- [34] Ekkelenkamp R, Veneman J, Van Der Kooij H. LOPES: a lower extremity powered exoskeleton [C]. Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2007: 3132-3133.
- [35] Thalman CM, Hsu J, Snyder L, et al. Design of a soft ankle-foot orthosis exosuit for foot drop assistance [C]. 2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2019: 8436-8442.
- [36] 王同, 王春宝, 韦建军, 等. 一种新型踝关节康复机器人系统设计[J]. *机械设计与研究*, 2021, 37(1): 47-53.  
Wang T, Wang CB, Wei JJ, et al. Systemic design and research of a novel ankle rehabilitation robot for hemiplegic survivors [J]. *Machine Design & Research*, 2021, 37(1): 47-53.
- [37] Sukal-Moulton T, Clancy T, Zhang LQ, et al. Clinical application of a robotic ankle training program for cerebral palsy compared to the research laboratory application: does it translate to practice? [J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2014, 95(8): 1433-1440.
- [38] 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.
- [39] Petrucci MN, MacKinnon CD, Hsiao-Weckslers ET. Modulation of anticipatory postural adjustments using a powered ankle orthosis in people with Parkinson's disease and freezing of gait [J]. *Gait & posture*, 2019, 72: 188-194.
- [40] Raffalt PC, Chrysanthou M, Duda GN, 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.
- [41] Berenpas F, Ge Urts AC, Boer JD, et al. Surplus value of implanted peroneal functional electrical stimulation over ankle-foot orthosis for gait adaptability in people with foot drop after stroke [J]. *Gait & Posture*, 2019, 71: 157-162.
- [42] 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]. 南京理工大学, 2013: 1-70.  
Wang SY. Research on control technology of knee rehabilitation robot based on surface EMG signal [D]. Nanjing Univ Sci Technol, 2013: 1-70.
- [43] Sameri Nedafi R, Moazemi Goudarzi A, Moghimi Ghadikolaei J. Empirical study of mechanical behavior of a designed active knee joint brace equipped by a series elastic actuator [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 1970, 49(1): 55-61.
- [44] 刘洪涛. 截瘫患者下肢康复机器人设计与实验研究 [D]. 燕山大学, 2010: 1-85.  
Liu HT. Design and experimental research of lower limb rehabilitation robot used for paraplegia patients [D]. Yanshan Univ, 2010: 1-85.
- [45] Shihomi K, Koji O, Tadao T, et al. Development of new rehabilitation robot device that can be attached to the conventional Knee-Ankle-Foot-Orthosis for controlling the knee in individuals after stroke [J]. *IEEE Int Conf Rehabil Robot*, 2017, 2017: 304-307.
- [46] Torrealba RR, Udelman SB, Fonseca-Rojas ED. Design of variable impedance actuator for knee joint of a portable human gait rehabilitation exoskeleton [J]. *Mechan Mach Theo*, 2017, 116: 248-261.
- [47] McGibbon CA, 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]. *Neuroeng Rehabil*, 2018, 15(1): 117.
- [48] 陈安民, 柯雯雯, 邵德成, 等. 我国两种髋关节功能评定方法的临床比较研究 [J]. *骨与关节损伤杂志*, 1998, 13(5): 3.  
Cheng AM, Ke WT, Shao DC, et al. Comparative study of two different hip function evaluation systems in our country [J]. *Chin J Bone Joint Injury*, 1998, 13(5): 3.
- [49] 梁文渊. 可穿戴型并联式髋关节助力机器人研究 [D]. 中国科学技术大学, 2012: 1-145.  
Liang WY. Research on wearable parallel assistive robot for hip joint power assist [D]. University of Science and Technology of China, 2012: 1-145.
- [50] Giovacchini F, Vannetti F, Fantozzi M, et al. A lightweight active orthosis for hip movement assistance [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2015, 73: 123-134.
- [51] Karavas N, Kim J, Galiana I, et al. Autonomous soft exosuit for hip extension assistance [M]. Springer International Publishing, 2017: 331-335.
- [52] Mogharabi M, Esfahani MK, Tahamipour-Z SM, et al. Assistive control of a hip exoskeleton assistance robot (hexa-i) for rehabilitation of stroke patients [C]. 2021 9th RSI International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM), IEEE, 2021: 523-529.