

# 踝关节康复机器人研究进展

周熙晔<sup>1\*</sup>, 王春宝<sup>1,2,3#</sup>, 韦建军<sup>1</sup>, 刘铨权<sup>2,3</sup>, 吴德帅<sup>1</sup>, 段丽红<sup>2,3</sup>, 张鑫<sup>2,4</sup>, 刘琦<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>广西科技大学, 机械与汽车工程学院, 广西 柳州

<sup>2</sup>深圳大学第一附属医院, 广东 深圳

<sup>3</sup>深圳市老年医学研究所, 广东 深圳

<sup>4</sup>深圳市大鹏新区南澳人民医院, 广东 深圳

收稿日期: 2022年4月23日; 录用日期: 2022年5月24日; 发布日期: 2022年5月31日

## 摘要

脑卒中具有发病人数量多、致残率高的特点, 给社会 and 患者家庭带来极大的痛苦。踝关节作为人体远端关节, 康复效果对生活质量具有重要影响。而传统人工辅助康复治疗的方式, 人力成本高, 患者的康复训练效果与治疗师的经验密切相关。康复机器人具有运动准确、稳定性好、训练均一性可控等优点, 具有良好的应用前景。国内外研究者已经在康复机器人领域开展了大量的研究工作。本文对近几年来国内外踝关节康复机器人的机械设计和控制策略的研究现状进行了较为详细的分类研究, 机械设计研究分类为穿戴方式、驱动方式和结构, 控制策略研究分类为导纳控制、阻抗控制、轨迹跟踪控制和人机交互等, 并分析了发展趋势和所面临的挑战, 最后对踝关节康复机器人研究现状进行总结。

## 关键词

踝关节康复机器人, 机械设计, 控制策略

# Research Progress of Ankle Rehabilitation Robot

Xiye Zhou<sup>1\*</sup>, Chunbao Wang<sup>1,2,3#</sup>, Jianjun Wei<sup>1</sup>, Quanquan Liu<sup>2,3</sup>, Deshuai Wu<sup>1</sup>, Lihong Duan<sup>2,3</sup>, Xin Zhang<sup>2,4</sup>, Qi Liu<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>School of Mechanical and Automotive Engineering, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou Guangxi

<sup>2</sup>The First Affiliated Hospital of Shenzhen University, Shenzhen Guangdong

<sup>3</sup>Shenzhen Institute of Geriatrics, Shenzhen Guangdong

<sup>4</sup>Shenzhen Dapeng New District Nan'ao People's Hospital, Shenzhen Guangdong

\*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 周熙晔, 王春宝, 韦建军, 刘铨权, 吴德帅, 段丽红, 张鑫, 刘琦. 踝关节康复机器人研究进展[J]. 人工智能与机器人研究, 2022, 11(2): 200-217. DOI: 10.12677/airr.2022.112022

## Abstract

Stroke has the characteristics of large number of people and high disability rate, which brings great pain to the society and patients' families. As the distal joint of human body, the rehabilitation effect of ankle has an important impact on the quality of life. The traditional artificial assisted rehabilitation treatment has high labor cost, and the rehabilitation training effect of patients is closely related to the experience of therapists. Rehabilitation robot has the advantages of accurate movement, good stability and controllable training uniformity, and has a good application prospect. Researchers at home and abroad have carried out a lot of research work in the field of rehabilitation robot. In this paper, the research status of mechanical design and control strategy of ankle rehabilitation robot at home and abroad in recent years is classified in detail. The mechanical design research is divided into wearing mode, driving mode and structure, and the control strategy research is divided into admittance control, impedance control, trajectory tracking control and human-computer interaction. The development trend and challenges are analyzed. Finally, the research status of ankle rehabilitation robot is summarized.

## Keywords

Ankle Rehabilitation Robot, Machine Design, Control Strategy

Copyright © 2022 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

据世界卫生组织统计报告发表文章指出,脑卒中已普遍存在于老龄人群中,其致残率高达 75%,其中重度致残者达 40%以上,80%~90%的幸存患者康复后会出现偏瘫后遗症[1]。随着科技发展和社会进步,康复机器人应运而生。康复机器人治疗效果稳定,能客观的评价患者恢复情况、与患者之间产生良好的交互等优点得到了患者的肯定。

据康复医学杂志调查报告指出:偏瘫患者在发病三个月内为康复黄金期,由于以人工训练为主的传统康复手段已经满足不了当前偏瘫患者的需求,80%的患者没有得到及时的康复,使得偏瘫患者康复后产生一系列的偏瘫后遗症。治疗师康复临床经验之间存在差异和患者与治疗师之间“一对一”治疗方案使得负担过重,而且治疗师缺乏客观的评定患者所需的治疗量化的方法,主观的经验限制了治疗效果。为了解决这些问题,许多科研机构 and 院校提出和研制了康复机器人来代替治疗师的一些治疗操作,这样不仅解决了内需和减轻治疗师负担,而且为患者提供了稳定、有效和精确的康复训练[2]。

现代的康复治疗手段包括神经促进技术、平衡训练、步行训练、转移训练、肌力训练、日常生活活动能力训练等方法。随着工业机器人的出现和发展,研究者在康复医疗领域研究出了各种各样的康复机器人,康复机器人集合康复医学、机器人学、控制学、人工智能学等学科知识,模仿治疗师康复手法用于帮助患者进行康复训练等各种较复杂的动作,来达到康复的目的。康复机器人能够长时间精准帮助患者进行康复训练,且不会“疲劳”。设计者编程程序使其能够完成各种不同的训练模式如:主动训练、

被动训练、阻抗训练、助力训练等，还能够检测患者肌肉状态和训练效果，减轻治疗师的负担，能有效改善我国康复治疗师不足的问题。

自 1987 年英国 Mike Topping 公司成功研制 Handy1 康复机器人样机并取得巨大成功后，智能康复逐渐成为医疗领域的热点。踝关节康复机器人主要分为两种，一种是基于平台的末端执行器类，另一种是外骨骼和矫形器的可穿戴类。本文主要介绍 2015 年至今的此类机器人，还包括此类机器人控制策略和实验评估。

本文通过阅读当前最新踝关节研究成果讲述踝关节康复机器人在结构设计和控制策略上的研究进展，见表 1 所示，并分析和总结，展望踝关节康复机器人发展趋势。

**Table 1.** Main content framework of this paper

**表 1.** 本文论述主要内容框架

论述大类	种类	特点
机构设计	穿戴方式	穿戴式与、穿戴式
	驱动方式	电驱动、气动
	结构	串联机构、并联机构
控制策略	导纳控制	感知力、位置和速度达到柔顺控制的目的
	阻抗控制	感知力、位置、速度使机器人运动平滑
	轨迹跟踪	通过生物识别生成最优轨迹和路线
	人机交互	触觉、听觉、视觉生物识别和玩游戏

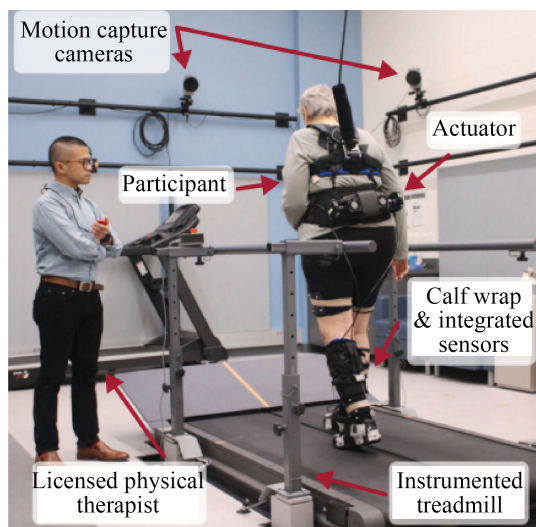
## 2. 康复机器人机构设计

康复机器人机构设计按固定方式可分为穿戴式和非穿戴式，驱动方式可分为气动、电动和液压驱动等，结构可分为串联式和并联式等。

### 2.1. 穿戴方式

#### 2.1.1. 可穿戴康复机器人

Christopher Sivi 等人研制了一款叫“exosuits”的柔软可穿戴机器人，实现“软外肌”辅助行走降低代谢成本如图 1 所示[3]。F. Tamburella 等人，研制了脚踝外骨骼，该动力踝关节外骨骼较轻便，患者行走时给脚踝助力，并降低代谢成本如图 2 [4]。Junghan Kwon 等人研制了踝关节矫形器，该矫形器经济、轻便，采用了 3D 打印技术，包括柔性支架和踝关节支架如图 3 [5]。Cristiana Pinheiro 等人研制了外骨骼机器人，是一种具有生物反馈的控制系统的机器人[6]。Greg Orekhov 等人研制了踝动力外骨骼机器人，该外骨骼通过减少腿部比目鱼肌等肌肉的运动负担来降低代谢成本如图 4 [7]。Gian Maria Gasparri 等人研制了脚踝外骨骼用于辅助行走[8]。Yupeng Ren 等人研制了可穿戴康复机器人，该机器人拥有外骨骼和末端执行器的综合性能[9]。合肥工业大学的陈冰等人研制了助力脚踝运动，运动的同时又进行发电的可穿戴式外骨骼[10]。凌峰阳等人研制了辅助患者行走和爬楼梯的可穿戴外骨骼机器人[11]。Zaile Mu 等人开发了可穿戴摆臂行走和主动踝关节控制的机器人外骨骼。张玉峰等人研制了基于振荡器的活性/半活性脚踝-足部矫形器[12]。北京大学的左世平等人研制的平台式踝关节康复机器人[13]。



**Figure 1.** Gait complex robot  
**图 1.** 步态复机器人



**Figure 2.** Ankle exoskeleton  
**图 2.** 踝关节外骨骼



**Figure 3.** Ankle foot apparatus  
**图 3.** 可穿戴踝足器

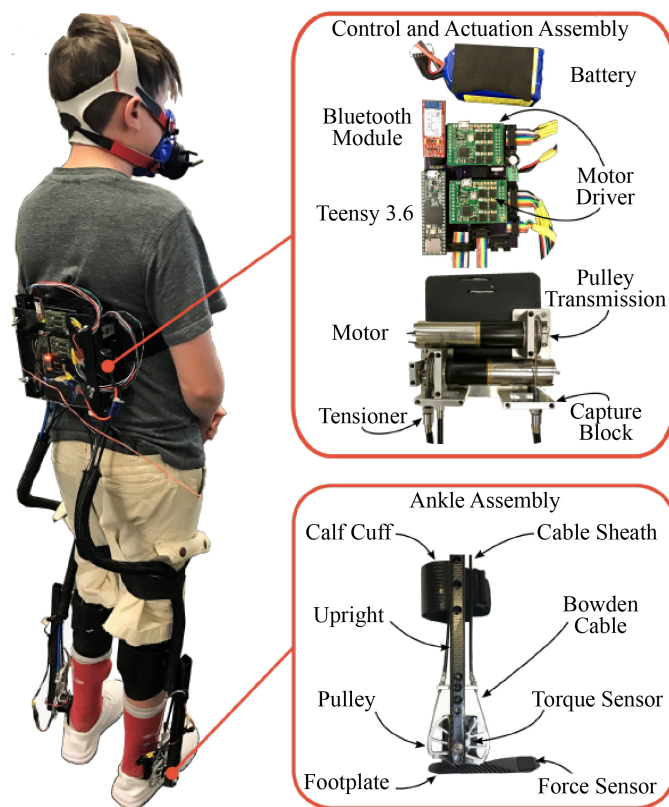


Figure 4. Exoskeleton  
图 4. 动力外骨骼

### 2.1.2. 非穿戴式

Mingjie Dong 等人研制了踝关节并联康复机器人, 该机器人通过织物将患者的脚固定在踏板如图 5 [14]。DaXing Zeng 等人研制了三旋转一运动的串联解耦机构的康复机器人, 作者采用静态/动态的康复策略, 机器人完全解耦如图 6 [15]。河南科技大学机电工程学院的刘延斌等人研制的气动肌肉冗余并联驱动踝关节康复机器人[16]。深圳老年医学研究所的刘铨权等人研制了新型踝关节康复平台[17]。Di Ao 等人开发了肌电图驱动的希尔型神经肌肉骨骼模型[18]。Guillermo Asín-Priot 等人研制了一款通过玩游戏进行主动训练的非穿戴式机器人[19]。EunKyung Bae 等人研制了新型机器人步态训练系统的下肢外骨骼, 该机器人将末端执行器系统与外骨骼相结合能让患者体验上下楼梯和步行的训练, 与可穿戴式不同, 该机器人只能在原地进行训练, 机器人机架整体是固定在地面上[20]。Latifah Nurahmi 等人研发了非穿戴式平台式机器人, 提供了机械设计方案和重新配置策略[21]。Prashant K. Jamwal 等人的非穿戴式平台式机器人, 该机器人能提供三个自由度, 通过生物力学知识生成最优路径和轨迹, 其修改路径的模块能明显降低机器人作用力[22]。Fares J. Abu-Dakka 等人研发的平台式并联机器人[23]。Juan C 等人研制一款在座椅上进行踝关节康复训练的机器人[24]。Yu Zhuang 等人研制的踝关节外骨骼[25]。中北大学的樊晓琴等人设计了混联式踝关节康复机器人, 该机器人由底座, 静平台, 支链和踏板组成如图 7 [26]。东北大学秦皇岛分校的王海芳等人研制了 3 自由度并联机构, 该机器人可进行主动训练、被动训练和语音控制训练, 有较高的控制精度和安全性, 但未进行临床试验图 8 [27]。北京工业大学的李大顺等人的 3-RRS 并联康复机构[28]。中北大学的刘兴芳等人提出一种 3-SPS/S 并联康复机构[29]。北京工业大学的李剑锋的机器人[30]。武汉理工大学的魏梦等人研制了多自由度柔性平台式康复机器人[31]。武汉大学的艾青松等人研



制了一种基于气动肌肉驱动的两自由度并联柔性踝关节康复机器人如图 9 [32]。Ting-Cheng Chang 等人研制了一款三自由度解耦运动的踝关节康复机器人，该机器人刚度和精度较高，结构紧凑，控制较方便，该机器人能进行跖屈/背屈、外展/内收和外翻/内翻，但该平台控制系统不够完善，不能实现辅助训练、主动阻力训练和被动牵引训练等[33]。Caidong Wang 等人开发了一款两自由度踝关节康复机器人，该机器人由上平台和下平台组成，上平台通过球销与下平台连接，采用刚柔并存的驱动结构，运动完全解耦，可实现三种运动如图 10 [34]。华南理工大学的刘其洪等人开发了踝关节康复机器人[35]。

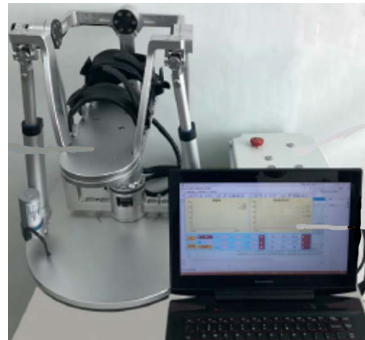


Figure 5. Robot platform  
图 5. 并联康复机器人平台

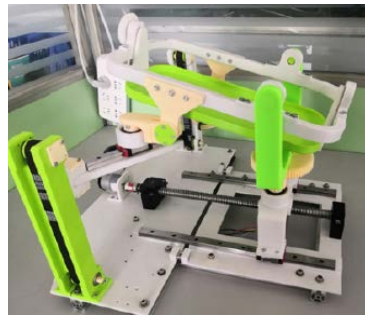


Figure 6. Parallel robot  
图 6. 新型踝足康复机器人

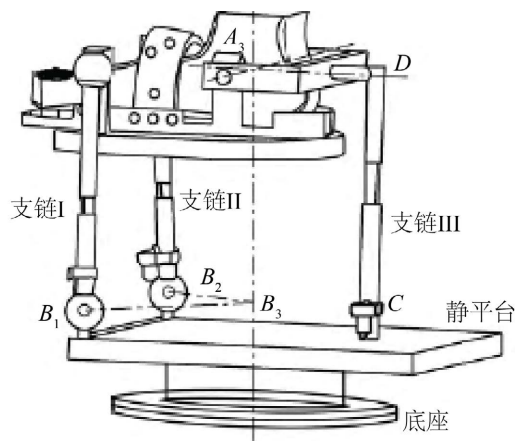


Figure 7. Hybrid robot  
图 7. 混联式踝关节康复机器人

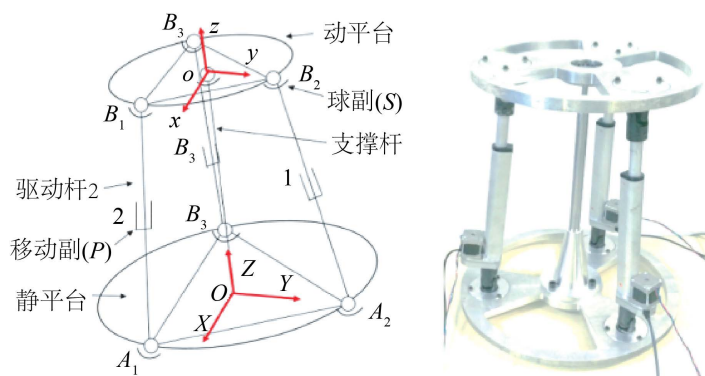


Figure 8. 3-DOF Parallel Robot  
图 8.3 自由度并联机构



Figure 9. Parallel robot  
图 9. 并联柔性踝关节机器人



Figure 10. Flexible robot  
图 10. 两自由度并联柔性机器人

## 2.2. 驱动方式

### 2.2.1. 气动

Prashant K. Jamwal 研制的平台式踝关节康复机器人采用了气动肌肉的驱动方式,气动肌肉具有轻便,工作简单,方便控制等优点[22]。Juan C 等人研制的机器人采用了气动弹簧的驱动方式,气动弹簧拥有稳定的速度,力变化小且容易控制[24]。魏梦等人的气动肌肉驱动的末端执行器,末端执行器是一个具有三

自由度的三连杆串联机械手，每个气动肌肉执行器由比例压力调节器控制，用于踝关节进行跖屈/背屈，内翻/外翻和内旋/外旋的康复训练[31]。武汉大学的艾青松等人研制了一种基于气动肌肉驱动的两自由度并联柔性踝关节康复机器人，该机器人由三块气动肌肉组成[32]。河南科技大学机电工程学院的刘延斌等人研制了气动肌肉冗余并联驱动踝关节康复机器人，该机器人具有较强的鲁棒性，结构简单[16]。

### 2.2.2. 电动

Christopher Siviý 等人研制了一款叫“exosuits”的柔软可穿戴机器人，采用 Bowden 电缆驱动，作者设计修改的驱动硬件能更好的安装在身体上，并且更好的连接在软式护具的纺织品上和传感器上[3]。Junghan Kwon 的单电机双向拉缆机构模块拥有简单轻便的优点[5]。Gian Maria Gasp Arri 也采用了伺服电机驱动钢索实现辅助踝关节的跖屈和背屈，结构简单且轻便，腰部模块包含控制系统和驱动组件通过 Bowden 电缆与踝关节组件连接和传递信息如图 11 [8]。Di Ao 的非穿戴式平台的伺服电机固定于地面，电机连接扭矩传感器，传感器连接踏板[18]。F. Tamburella 等人的脚踝外骨骼采用由电机 + 主轴 + 钢板弹簧的线性制动器[4]。Guillermo Asín-Priot 的踝关节机器人采用了单伺服电机驱动控制训练[19]。EunKyung Bae 等人研制的外骨骼采用至少 5 个电机驱动下肢不同部位进行训练，包括髋关节(四自由度)，膝关节(五自由度)，踝关节(六自由度)等电机驱动部位[20]。Fares J. Abu-Dakka 等人采用了电机驱动式的滚珠丝杆的驱动方式，该方驱动方式具有良好的稳定性[23]。Yupeng Ren 等人研制了可穿戴康复机器人，该机器人采用了具有成本较低，结构简单和控制简单的旋转电机组[9]。合肥工业大学的陈冰等人研制了由电动机和扭力弹簧驱动的外骨骼，结构简单，外观还需改进如图 12 [10]。凌峰阳等人研制了驱动模块由电机和四个齿轮组成的串联机构，结构简单紧凑体积小如图 13 [11]。Yu Zhuang 等人的外骨骼机器人采用了伺服电机[25]。Zaile Mu 等人研制了可穿戴摆臂行走和主动踝关节控制的机器人外骨骼，该机器人均采用电机进行驱动如图 14 [12]。张玉峰等人研制的可穿戴外骨骼机器人采用了两个无刷电机驱动具有 Bowden 电缆的机械结构来实现脚踝的跖屈和背屈[13]。东北大学秦皇岛分校的王海芳等人研制了 3 自由度并联机构，该机构通过伺服电机驱动三个杆实现平台三个自由度的旋转(跖屈背屈，内旋外旋，内翻外翻) [27]。北京工业大学的李剑锋的机器人采用了旋转编码器，线性制动器和步进电机进行驱动[30]。北京大学的左世平等人采用伺服电机进行驱动，通过谐波减速器传递扭矩[13]。Mingjie Dong 等人研制了踝关节并联康复机器人采用两个直线电机进行两个方向驱动[14]。Caidong Wang 等人开发了一款两自由度踝关节康复机器人，该机器人通过伺服电机驱动多轴运动[34]。华南理工大学的刘其洪等人开发了踝关节康复机器人，无刷直流伺服电机连接同步带并经过传感器最后带动脚踏板实现踝关节训练[35]。深圳老年医学研究所的刘铨权等人研制了新型踝关节康复平台[17]。



Figure 11. Bowden cable exoskeleton  
图 11. Bowden 电缆动力外骨骼

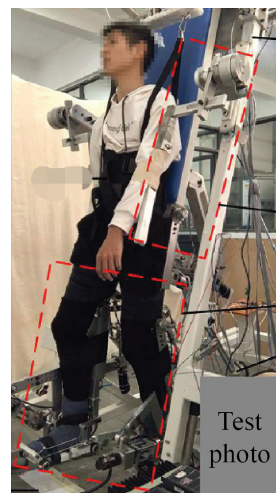




**Figure 12.** Exoskeleton  
**图 12.** 电力驱动外骨骼



**Figure 13.** Electric series mechanism  
**图 13.** 电动串联机构



**Figure 14.** Robot exoskeleton with wearable swing arm walking and ankle joint control  
**图 14.** 可穿戴摆臂行走和动踝关节控制的机器人外骨骼

## 2.3. 结构

### 2.3.1. 串联

Christopher Siviý 的“exosuits”的柔软可穿戴机器人采用电缆驱动串联机构如图 1 [3]。F. Tamburella 的外骨骼由电机、主轴、钢板弹簧组成的出啊不能连机构，Junghan Kwon 的单电机双向拉缆机构采用串联机构通过传感模块、驱动模块和实时控制系统的作用，能准确的预测控制相位如[5]。Greg Orekhov 的穿戴式机器人的驱动装置通过 Bowden 电缆传递力，以旋转踝关节滑轮和踏板来提供足底或背屈协助[7]。Gian Maria Gasparri 的穿戴式机器人的每个脚踝采用单电机驱动钢索，轮滑和踏板的串联机构[8]。Di Ao 踝关节外骨骼采用单伺服电机直接驱动踝关节运动[18]。Guillermo Asín-Priot 的外骨骼串联方式与 DiAo 类似采用单电机直接驱动踏板达到脚踝的跖屈背屈[19]。EunKyung Bae 等人研制的外骨骼拥有多个串联机构，每个串联机构有一个伺服电机驱动，使患者能进行上下楼梯和步行训练，拥有被动模式和辅导模式两种辅助助力模式，电阻模式和活动模式共四种训练模式[20]。Juan C 研制的机器人采用了气动弹簧驱动杆和踏板对踝关节进行跖屈和背屈训练[24]。Yupeng Ren 等人研制了可穿戴康复机器人，采用电机直接输出驱动踝关节模块实现跖屈和背屈的运动[9]。合肥工业大学的陈冰等人研制了串联弹性制动器，该制动器由电机，行星齿轮箱，扭力弹簧和锥齿轮组成，另外磁流变制动器负责调整矫形器的粘度[10]。凌峰阳等人研制了由一个电机驱动齿轮对踝关节模块进行直接驱动串联机构的穿戴式外骨骼[11]。Yu Zhuang 的踝关节外骨骼图 15 [25]。Zaile Mu 的踝关节外骨骼通过多个电机分别串联驱动髌关节模块，jianguanjie 模块，膝关节模块，和踝关节模块，多个电机同步运转[12]。张玉峰等人研制的半活性脚踝-足部矫形器采用简单轻便的串联机构实现了方便患者穿戴行走的功能[13]。Mingjie Dong 等人研制了踝关节并联康复机器人，该机器人能进行背屈、跖屈、倒置和外翻，具有较好的康复效果[14]。



Figure 15. dynamic exoskeleton of ankle joint

图 15. 踝关节动力外骨骼

### 2.3.2. 并联

Latifah Nurahmi 等人设计了基于约束的设计、优化设计和 3-RPS 并联机械手的重构策略，提高了机构的控制精度。Prashant K. Jamwal 的并联机器人拥有三个自由度，采用了四个平行启动驱动器，机构稳定性好，精度高如图 16 [22]。Fares J. Abu-Dakka 等人研发了三自由度踝关节并联机器人，该机器人由三个运动链与耦合杆相连再垂直的连接到平台上，缺点在于平台结构过大，不便进行康复训练如图 17 [23]。中北大学的樊晓琴等人研制了并联式踝关节康复机器人，该机器人采用了支链连接静平台和踏板的结构，但却少控制系统、人机交互、传感器，只进行了机械设计[26]。东北大学秦皇岛分校的王海芳等人研制了 3 自由度并联机构，该机构由动平台，静平台，驱动杆，和支撑杆组成[27]。北京工业大学的李大顺等人研制了 3-RRS 并联康复机构[28]。中北大学的刘兴芳等人提出一种 3-SPS/S 并联康复机构[29]。北京工业大学的李剑锋等人研制了一款踝关节并联结构，该机器人具有三个自由度，主要由基座，L 形框架，运

动分支，V形框架，直线执行器2号，上平台，下平台和“关节”和动平台组成如图18 [30]。魏梦等人的柔性并联踝关节康复机器人，该机器人由四个平行连杆进行驱动，实现末端执行器的自由度旋转，具有控制精度高，结构紧凑，运动简单等优势如图19 [31]。左世平的并联机器人具有足够的运动各向同性、高的力传递性能和大的最大扭矩性能，机器人提供主动训练和被动训练，治疗师能对机器人进行规划训练，适合踝关节康复[13]。武汉大学的艾青松等人研制了一种基于气动肌肉驱动的两自由度并联柔性踝关节康复机器人[32]。Caidong Wang 等人开发踝关节康复机器人，该机器人由上平台和下平台组成，上平台通过球销与下平台连接，采用刚柔并存的驱动结构，运动完全解耦，具有控制方便，结构简单等优点，其控制系统由PC、伺服驱动控制和多轴运动控制卡组成[34]。河南科技大学机电工程学院的刘延斌等人研制了气动肌肉冗余并联驱动踝关节康复机器人[16]。

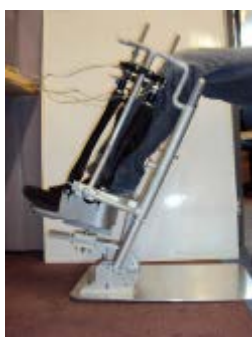


Figure 16. Pneumatic robot  
图 16. 气动并联机器人



Figure 17. Parallel ankle robot  
图 17. 并联踝关节机器人



Figure 18. Multi DOF Robot  
图 18. 多自由度并联机器人



**Figure 19.** Flexible robot  
**图 19.** 柔性并联踝关节康复机器人

### 3. 控制策略

#### 3.1. 反馈导纳控制策略

Christopher Siviý 等人使用了离线辅助优化方案来隔离积极和消极的增强力量, 采用了导纳控制, 反馈导纳控制器对残余力误差进行补偿, 基于力误差测量生成索速度命令, 该方法允许命令一个完整的力轮廓, 允许一个可以显式改变增强功率的实验[3]。Fares J. Abu-Dakka 等人研发了三自由度踝关节并联机器人, 作者提出基于动态运动原语(能有效编码和运动轨迹再现)和迭代学习控制的学习控制方案, 该控制方案能更好的对不同的患者进行针对性的最好治疗轨迹, 能避免患者关节运动角度过大造成疼痛也能达到最好的治疗效果, 最后轨迹的调整采用导纳控制或者阻抗控制[23]。Yupeng Ren 等人研制的可穿戴康复机器人采用了游戏视频训练与导纳控制相结合的控制方式, 通过力传感器识别踝关节扭矩力, 控制踝关节模块执行阻抗训练或者辅助力训练(控制位移, 速度和力的大小) [9]。Zaile Mu 等人开发了可穿戴摆臂行走和主动踝关节控制的机器人外骨骼, 该机器人采用闭环位置控制和可调导纳控制算法, 能帮助患者地调整脚踝机构的运动轨迹。创新点在于手臂摆动行走和主动踝关节控制的训练方法, 让患者自行输入来调节踝关节机构[12]。张玉峰等人研制了基于振荡器的活性/半活性脚踝-足部矫形器, 该机器人在阻抗控制的基础上融入了足底振动刺激体感觉具有一定的自适应性[13]。

#### 3.2. 自适应阻抗控制

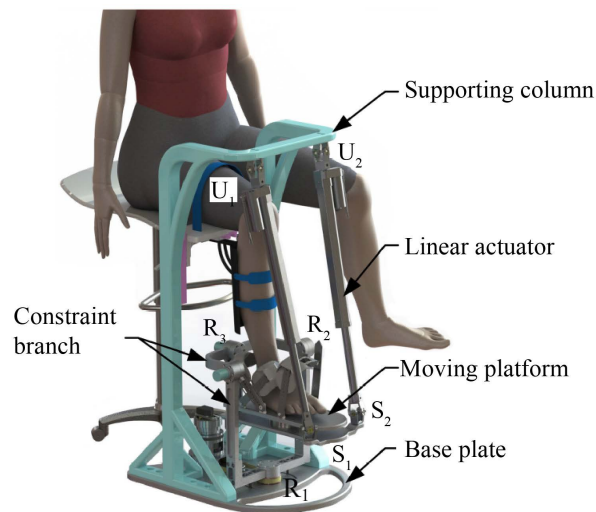
Juan C 等人研制了自适应阻抗控制机器人, 该控制方式促进了患者参与康复治疗的主动性, 另外, 根据患者的参与度, 来调整机器人的阻抗参数设定, 最后通过玩游戏来调整训练方式如图 20 [24]。张玉峰等人研制的半活性脚踝-足部矫形器采用力反馈和振动刺激的方式提供外骨骼辅助行走的感觉反馈的 AAN 控制策略[13]。左世平等人的并联康复机器人采用实现多种康复策略, 包括基于位置控制的 ROM 治疗、基于阻抗控制的力量治疗和基于意图识别的自体感受治疗如图 21 [13]。河南科技大学机电工程学院的刘延斌等人研制了气动肌肉冗余并联驱动踝关节康复机器人, 采用了柔顺控制策略, 和阻抗控制, 研究了无误差力跟踪方法, 机器人运动平滑具有较强的鲁棒性[16]。深圳老年医学研究所的刘铨权等人研制了新型踝关节康复平台, 开发了三种锻炼模式: 恒速锻炼、恒转矩阻抗锻炼和意识锻炼模式, 用于偏瘫患者早期神经康复如图 22 [17]。

#### 3.3. 人机交互

Cristiana Pinheiro 的踝关节机器人基于人机交互的生物反馈控制策略, 机器人能向患者提供振动触觉和听觉上的提示并且结合治疗师的指导到达有效的人机交互训练模式, 作者还提出了关节运动策略,



**Figure 20.** Ankle robot  
**图 20.** 踝关节并联机器人



**Figure 21.** Parallel robot  
**图 21.** 可穿戴并联康复机器人



**Figure 22.** New ankle rehabilitation platform  
**图 22.** 新型踝关节康复平台

用户参与策略和并行策略以达到更安全和更好治疗效果，该机器人通过视觉、听觉和触觉调整交互扭矩的方向和大小，是一种具有生物反馈的控制系统的机器人[6]。Guillermo Asín-Priot 等人研制了一款通过视频游戏视觉反馈和触觉反馈的踝关节外骨骼，该机器人平台的控制系统包含了零扭矩比例积分微分控制器和触觉自适应反馈模块，通过视频游戏视觉反馈进行不同的关节运动。系统会更具患者的表现自主调节游戏和训练任务难度，游戏人机交互方式和康复训练结合能有效增加兴奋度，但不能增加腓肠肌内



侧肌兴奋,但不适用于残疾患者和脑卒中患者如图 23 [19]。东北大学秦皇岛分校的王海芳等人研制了 3 自由度并联机构,该机器人拥有选择多种训练模式的人机交互界面和语音,通过硬件和软件实现运动控制器、传感器模块、语音模块、显示器模块、降压模块、继电器模块的控制。软件部分主要包括上位机界面程序、控制程序以及 Arduino 控制板程序[27]。

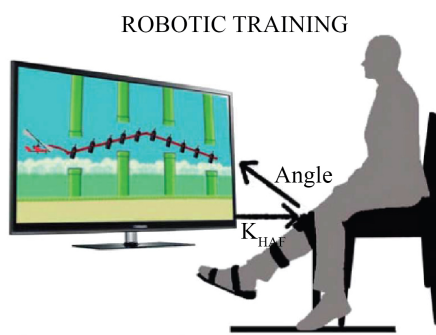


Figure 23. Ankle exoskeleton with biofeedback control system

图 23. 一种具有生物反馈的控制系统的踝关节外骨骼

### 3.4. 肌电信号

Di Ao 等人开发了肌电图驱动的希尔型神经肌肉骨骼模型(HNM), (HNM)较线性比例模型(LPM)控制更精确,患者使用(HNM)更省力,主动控制在生理上更自然,是未来人机互动的热点方向如图 24 [18]。Yu Zhuang 等人开发了基于肌电信号控制导纳控制的脚踝康复机器人(肌电信号“预判”患者的运动导纳进行控制),但肌电信号是随机的且非线性的,所以不稳定。作者使用导纳滤波器,为踏板提供动态跟踪的参考角度,并采用比例微分控制器提高控制的稳定性[25]。

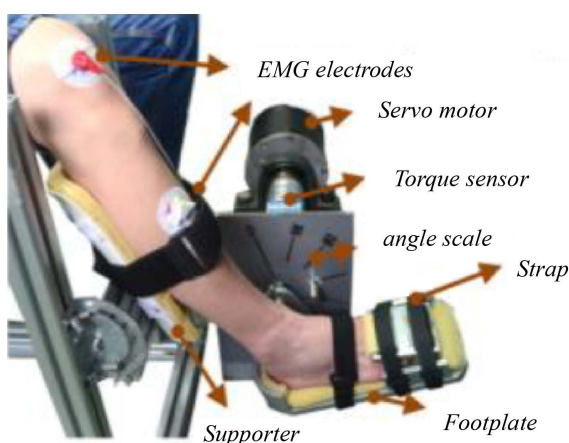


Figure 24. EMG control robot

图 24. 基于肌电控制的康复机器人

### 3.5. 轨迹跟踪控制

EunKyung Bae 等人研制外骨骼机器人主控制器采用轨迹跟踪控制,并对位置,速度和加速度,摩擦扭矩,重力进行轨迹的补偿如图 25 [20]。Prashant K. Jamwal 等人研制了并联踝关节康复机器人,其修改

路径的模块能明显降低机器人作用力,且不需要生物传感器的参与,但也增加了后期数据处理的复杂性,通过生物力学知识生成最优路径和轨迹。该机器人性能和安全性较好[22]。武汉大学的艾青松等人研制了一种基于气动肌肉驱动的两自由度并联柔性踝关节康复机器人,轨迹跟踪性能较好,抗干扰能力强,但模型具有不确定性[32]。



Figure 25. Lower limb robot

图 25. 可穿戴下肢外骨骼

### 3.6. 其他控制方法

魏梦等人的康复机器人采用了迭代学习的控制方法,提出一种多自由度归一化 IFT 技术,并提供了一种具有学习能力的方法来实现控制器参数的最优,从而提高了控制器的鲁棒性,该机器人结构简单,控制方便。提出了一种用于永磁同步电机的 ABS-SMC 控制器,可以估计外部干扰,并实时调整控制输出。与传统方法相比,ABS-SMC 具有更好的轨迹跟踪性能。该方法可以大大降低抖振,从而减少对患者二次损伤如所示[31]。

## 4. 康复机器人面临的挑战

在过去 10 年里,人们一直在研究并开发踝关节康复机器人,为了能改善患脑卒中患者的生活,让患者的脚踝恢复灵活,最终改善步态功能,但市面上要普及商用的康复机器人还有很长的路要走。

设计者很难设计出既简单又效果好的程序系统,大部分式因为缺乏临床试验所导致,所以研究费用高且难以控制。相关临床试验的样本量仍然很小,没有强有力的支持证据和公认的成功率,很难说服医疗从业者购买这些机器人的高资本成本。康复机器人与普通的商品不同,康复机器人需满足人的多样需求,能够对每一个患者“量身定做”,达到一个设备能满足不同人群,并且达到对应的预期治疗效果。

平滑性是另一个挑战。确保其稳定性通常采用多种传感器来识别机器人的运动角度、强度和速度。如果传感器失灵,冗余传感器会介入进行相应补偿。使用合适的控制策略也能提高稳定性,目的是监控传感器和致动器,可以降低脚踝等部位受伤的风险,将运动角度、力、速度等控制在安全范围内。还装有急停装置,在紧急情况下能自动或手动急停装置。虽然目前设计者设计了各种稳定的安全措施,但仍然需要物理治疗师的持续监督,并且通常需要额外的外部支持或复杂的程序。

机器人的动态特性是主要的挑战之一。目前,没有任何设备能够在帮助患者运动方面与人类治疗师的灵活性或人类治疗师在基于患者反馈的实时评估提供机械输入方面的智能相匹配。因此,仍然需要在神经科学和康复工程方面取得实质性进展。大多数设计都考虑了使用各种传感器、执行器和控制策略来

提高机器人的后驱动能力、自然顺应性和柔性机制，以匹配治疗师的灵活性。人工智能的实现也被考虑并嵌入到几个设计中，用于决策目的——定制病人。

## 5. 总结

脑卒中患者数量的增多，带来的是对康复训练的大量需求。康复治疗的意义：1) 可以预防患者的病情的发生和进一步的严重。2) 能够防止肌肉萎缩，肢体僵硬等。3) 能促进机体的循环功能和运动功能障碍的恢复。4) 能够提高治疗效果。5) 能减轻家庭和社会的负担等。有研究表明：治疗的时间、强度、重复次数、执行任务导向性的练习，并将自上而下和自下而上的方法结合起来，可以促进大脑可塑性和功能恢复。

与 10 年前康复机器人相比，当代的康复机器人具有更先进的控制系统，机器人控制精度更高，更加简单的结构，硬件方面更加先进，引入了肌电控制、脑电控制等一些新出现的技术，引入数据采集能更好的监测患者训练效果并进行下一步的治疗。

预测未来踝关节康复机器人主要以平台式康复机器人为主，运用于医院或居家进行康复训练，主要功能以主动训练和被动训练为前提，加入游戏等人机交互方式以提高患者的参与度从而提高治疗效果。

本文对近几年来国内外踝关节康复机器人的机械设计和控制策略的研究现状进行了较为详细的分类研究，具有一定的参考性，有利于初学者快速入门，方便科研工作者寻找思路。尽管面临很多挑战，望未来，康复机器人能通过互联网实现远程康复治疗，成本能被大众所接受广泛商用用于社会。

## 基金项目

国家自然科学基金(No.61963007)，广东省基础与应用基础研究基金(No.2021A1515011907)，深圳市基础研究面上项目(JCYJ20210324122200002)，广东省医学科学基金(No.B2021020)，深圳市大鹏新区医疗健康集团医疗卫生科研项目(2021JTLCYJ03)。

## 参考文献

- [1] 刘彦, 陆美华. 探讨品管圈干预对提高孕晚期妇女母乳喂养自我效能的效果[J]. 中国医药科学, 2017, 15(14): 109-111.
- [2] 吕星, 王春宝, 段丽红, 吴正治, 王玉龙, 韦建军, 龙建军, 刘铨权, 申亚京, 尚万峰, 林焯华, 陆志祥, 陈晓娇. 偏瘫患者下肢康复机器人的研究进展[J]. 深圳中西医结合杂志, 2019, 29(11): 187-190.
- [3] Siviyy, C., Bae, J., Baker, L., Porciuncula, F., Baker, T., Ellis, T.D, Awad, L.N. and Walsh, C.J. (2020) Offline Assistance Optimization of a Soft Exosuit for Augmenting Ankle Power of Stroke Survivors during Walking. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 5, 828-835. <https://doi.org/10.1109/LRA.2020.2965072>
- [4] Tamburella, F., Tagliamonte, N.L., Pisotta, I., Masciullo, M., Arquilla, M., van Asseldonk, E.H.F., van der Kooij, H., Wu, A.R., Dzeladini, F., Ijspeert, A.J. and Molinari, M. (2020) Neuromuscular Controller Embedded in a Powered Ankle Exoskeleton: Effects on Gait, Clinical Features and Subjective Perspective of Incomplete Spinal Cord Injured Subjects. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 28, 1157-1167. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2020.2984790>
- [5] Kwon, J., Park, J., Ku, S., Jeong, Y., Paik, N. and Park, Y. (2019) A Soft Wearable Robotic Ankle-Foot-Orthosis for Post-Stroke Patients. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 4, 2547-2552. <https://doi.org/10.1109/LRA.2019.2908491>
- [6] Pinheiro, C., Magalhes, N., Figueiredo, J., et al. (2020) Wearable Biofeedback Improves Human-Robot Compliance during Ankle-Foot Exoskeleton-Assisted Gait Training: A Pre-Post Controlled Study in Healthy Participants. *Sensors*, 20, 5876. <https://doi.org/10.3390/s20205876>
- [7] Orekhov, G., Fang, Y., Luque, J. and Lerner, Z.F. (2020) Ankle Exoskeleton Assistance Can Improve Over-Ground Walking Economy in Individuals with Cerebral Palsy. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 28, 461-467. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2020.2965029>
- [8] Gasparri, G.M., Luque, J. and Lerner, Z.F. (2019) Proportional Joint-Moment Control for Instantaneously Adaptive

- Ankle Exoskeleton Assistance. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, **27**, 751-759. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2019.2905979>
- [9] Ren, Y.P., Wu, Y.-N., Yang, C.-Y., Xu, T., Harvey Richard, L. and Zhang, L.-Q. (2017) Developing a Wearable Ankle Rehabilitation Robotic Device for in-Bed Acute Stroke Rehabilitation. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, **25**, 589-596.
- [10] Chen, B., Zi, B., Wang, Z., et al. (2020) Development of Robotic Ankle-Foot Orthosis with Series Elastic Actuator and Magneto-Rheological Brake. *Journal of Mechanisms and Robotics*, **13**, 011002. <https://doi.org/10.1115/1.4047987>
- [11] Yeung, L.F., Lau, C.C., Lai, C.W., et al. (2020) Effects of Wearable Ankle Robotics for Stair and Over-Ground Training on Sub-acute Stroke: A Randomized Controlled Trial. (Preprint) <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-34302/v1>
- [12] Mu, Z.L., Zhang, Q.J., Yang, G.-Y., Xie, L. and Fang, J. (2020) Development of an Improved Rotational Orthosis for Walking with Arm Swing and Active Ankle Control. *Frontiers in Neurobotics*, **14**, 17. <https://doi.org/10.3389/fnbot.2020.00017>
- [13] Zuo, S.P., Li, J.F., Dong, M.J., Zhou, X.D., Fan, W.P. and Kong, Y. (2020) Design and Performance Evaluation of a Novel Wearable Parallel Mechanism for Ankle Rehabilitation. *Frontiers in Neurobotics*, **14**, 9. <https://doi.org/10.3389/fnbot.2020.00009>
- [14] Dong, M.J., Kong, Y., Li, J.F., Fan, W.P. and Rizzuto, E. (2020) Kinematic Calibration of a Parallel 2-UPS/RRR Ankle Rehabilitation Robot. *Journal of Healthcare Engineering*, **2020**, Article ID: 3053629. <https://doi.org/10.1155/2020/3053629>
- [15] Zeng, D., Wu, H., Zhao, X., et al. (2020) A New Type of Ankle-Foot Rehabilitation Robot Based on Muscle Motor Characteristics. *IEEE Access*, **8**, 215915-215927. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3040886>
- [16] 刘延斌, 庞翔元, 张彦斌, 郭冰菁, 韩建海. 踝关节康复机器人主动训练柔顺控制研究[J]. 系统仿真学报, 2020, 32(1): 54-60.
- [17] Liu, Q.Q., Wang, C.B., Long, J.J., Sun, T.Y., Duan, L.H., Zhang, X., Zhang, B., Shen, Y.J., Shang, W.F., Lin, Z.H., Wang, Y.L., Xia, J.F., Wei, J.J., Li, W.G., Wu, Z.Z. and Affatato, S. (2018) Development of a New Robotic Ankle Rehabilitation Platform for Hemiplegic Patients after Stroke. *Journal of Healthcare Engineering*, **2018**, Article ID: 3867243. <https://doi.org/10.1155/2018/3867243>
- [18] Ao, D., Song, R. and Gao, J.W. (2017) Movement Performance of Human-Robot Cooperation Control Based on EMG-Driven Hill-Type and Proportional Models for an Ankle Power-Assist Exoskeleton Robot. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, **25**, 1125-1134. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2016.2583464>
- [19] Asín-Prieto, G., Martínez-Expósito, A., Barroso, F.O., Urendes, E.J., Gonzalez-Vargas, J., Alnajjar, F.S., González-Altred, C., Shimoda, S., Pons, J.L. and Moreno, J.C. (2020) Haptic Adaptive Feedback to Promote Motor Learning with a Robotic Ankle Exoskeleton Integrated with a Video Game. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, **8**, 113. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.00113>
- [20] Bae, E.K., Park, S.-E., Moon, Y., Chun, I.T., Chun, M.H. and Choi, J. (2020) A Robotic Gait Training System with Stair-climbing Mode Based on a Unique Exoskeleton Structure with Active Foot Plates. *International Journal of Control, Automation and Systems*, **18**, 196-205. <https://doi.org/10.1007/s12555-019-0260-9>
- [21] Nurahmi, L., Caro, S. and Solichin, M. (2019) A Novel Ankle Rehabilitation Device Based on a Reconfigurable 3-RPS Parallel Manipulator. *Mechanism and Machine Theory*, **134**, 135-150. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2018.12.017>
- [22] Jamwal, P.K., Hussain, S., Yun, H.T., et al. (2020) Musculoskeletal Model for Path Generation and Modification of an Ankle Rehabilitation Robot. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, **50**, C2-C2. <https://doi.org/10.1109/THMS.2020.3021781>
- [23] Abu-Dakka, F.J., Valera, A., Escalera, J.A., Abderrahim, M., Page, A. and Mata, V. (2020) Passive Exercise Adaptation for Ankle Rehabilitation Based on Learning Control Framework. *Sensors*, **20**, 6215. <https://doi.org/10.3390/s20216215>
- [24] Pérez-Ibarra, J.C., Siqueira, A., Silva-Couto, M.A., et al. (2018) Adaptive Impedance Control Applied to Robot-Aided Neuro-Rehabilitation of the Ankle. *IEEE Robotics and Automation Letters*, **4**, 185-192. <https://doi.org/10.1109/LRA.2018.2885165>
- [25] Zhuang, Y., Leng, Y., Zhou, J., et al. (2020) Voluntary Control of an Ankle Joint Exoskeleton by Able-Bodied Individuals and Stroke Survivors Using EMG-Based Admittance Control Scheme. *IEEE Transactions on Bio-Medical Engineering*, **68**, 695-705.
- [26] 樊晓琴, 李瑞琴, 李庠, 郭旺旺, 王秀娇. (2-SPS+PU)&R 混联式踝关节康复机器人及运动学性能分析[J]. 机械科学与技术, 2019, 38(7): 1035-1040.
- [27] 王海芳, 陈晓波, 张瑶, 焦龙, 李新庆, 朱亚锟. 3-SPS/S 踝关节并联式康复机器人设计[J]. 中国工程机械学报,

- 2020, 18(3): 237-241, 247.
- [28] 李大顺, 李剑锋, 王飒, 张琪涣. 并联 3-RRS 踝关节康复机构及运动分析[J]. 机械设计与制造, 2015(8): 4-8.
- [29] 刘兴芳, 苗鸿宾, 陈菁瑶, 刘娜. 并联 3-SPS/S 踝关节康复机构及运动分析[J]. 机械传动, 2018, 42(3): 9-12.
- [30] Li, J.F., Zuo, S.P., Zhang, L.Y., Dong, M.J., Zhang, Z.K., Tao, C.J. and Ji, R. (2020) Mechanical Design and Performance Analysis of a Novel Parallel Robot for Ankle Rehabilitation. *Journal of Mechanisms and Robotics*, **12**, 051007. <https://doi.org/10.1115/1.4046511>
- [31] Wei, M., Sheng, Q.X., Quan, L., *et al.* (2017) Robust Iterative Feedback Tuning Control of a Compliant Rehabilitation Robot for Repetitive Ankle Training. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, **22**, 173-184. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2016.2618771>
- [32] Ai, Q.S., Zhu, C.X., Zuo, J., Meng, W., Liu, Q., Xie, S.Q. and Yang, M. (2017) Disturbance-Estimated Adaptive Backstepping Sliding Mode Control of a Pneumatic Muscles-Driven Ankle Rehabilitation Robot. *Sensors (Basel, Switzerland)*, **18**, 66. <https://doi.org/10.3390/s18010066>
- [33] Chang, T.-C. and Zhang, X.-D. (2019) Kinematics and Reliable Analysis of Decoupled Parallel Mechanism for Ankle Rehabilitation. *Microelectronics Reliability*, **99**, 203-212. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2019.05.016>
- [34] Wang, C.D., Wang, L.W., Wang, T.H., Li, H.P., Du, W.L., Meng, F.N. and Zhang, W.W. (2019) Research on an Ankle Joint Auxiliary Rehabilitation Robot with a Rigid-Flexible Hybrid Drive Based on a 2-S'PS' Mechanism. *Applied Bionics and Biomechanics*. <https://doi.org/10.1155/2019/7071064>
- [35] 刘其洪, 卢志江, 王春宝, 李伟光, 李梦杰, 孙同阳, 段丽红, 王玉龙, 吴正治, 秦鉴, 韦建军. 踝关节智能康复机器人的设计[J]. 现代制造工程, 2016(9): 39-43.