

# 康复机器人研究与应用进展

王秋惠<sup>1</sup>, 魏玉坤<sup>1</sup>, 刘力蒙<sup>2</sup>

(1.天津工业大学 机械工程学院, 天津 300387; 2.美国普渡大学 工程学院, 西拉法叶 47907)

**摘要:** **目的** 随着老龄人口与脑卒中患者数量的不断增加, 以及辅助治疗成本的增长, 老龄服务及康复需求问题日益突出。康复机器人的开发及应用, 将成为未来解决老龄问题的重要手段, 具有积极的理论价值和现实意义。它融合了人工智能、机器人学、机械、生物力学、信息科学及康复医学等诸学科相关知识, 逐渐发展成为医疗机器人领域的一个重要分支, 成为学界研究热点。在此背景下, 对康复机器人研究与应用进展进行述评, 梳理康复机器人技术的演进历程。**方法** 基于文献成果、大学实验室研究动态及产业调查, 分析了康复机器人功能分类、人机交互方式及其关节角度与力矩、肌电信息感知融合与控制、力反馈控制、空间运动检测等关键技术。分析上肢、下肢康复机器人的发展状况。**结论** 提出康复机器人 HRI 人机交互安全性、人机工程及人机界面设计中存在的问题及发展趋势, 以期为学界后续研究提供有益的借鉴。

**关键词:** 康复机器人; 关键技术; 人机交互; 研究应用进展

**中图分类号:** TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)18-0083-07

**DOI:** 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.18.018

## Review of Rehabilitation Robot on Research and Application

WANG Qiu-hui<sup>1</sup>, WEI Yu-kun<sup>1</sup>, LIU Li-meng<sup>2</sup>

(1.School of Mechanical Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China;

2.College of Engineering, Purdue University, West Lafayette 47907, USA)

**ABSTRACT:** With the increasing number of the aged population and stroke patients, and the increasing cost of adjuvant treatment, the problem of the needs of the aged service and rehabilitation becomes more and more seriously. The development of research and application of rehabilitation robot will become an important means to solve the problem of aging in the future, which has positive theoretical value and practical significance. It combines knowledge of artificial intelligence, robotics, mechanics, biomechanics, information science and rehabilitation medicine, and gradually becomes an important branch in the field of medical robot, and become a hot spot in academic. In this paper, we review the research and application progress of rehabilitation robot, and sorts out the evolution process of rehabilitation robot technology. Based on the literature results, the research dynamics of the university laboratory and the industrial surveys, we analyze Based on the research outcome from reference, university Labs and industries, summarized the rehabilitation robot's function, classification, interactive way, key technology, including the joint angle, joint torque, sEMG, force feedback, and space motion detection technology, analyzed the development status of the upper-limb and low-limb rehabilitation robots. We put forward the problems and development trends in design of Human-Robot Interaction security, Human-Robot Engineering and Human-Robot interface of rehabilitation robot. We hope to provide useful reference for subsequent research in the academic world in future.

**KEY WORDS:** rehabilitation robot; Human-robot technology; Human-robot interaction; review

收稿日期: 2018-04-07

基金项目: 国家自然科学基金(71641021); 全国老龄委老龄政策理论研究部级课题(QLB2018A053)

作者简介: 王秋惠(1969—), 女, 山东人, 博士, 天津工业大学副教授, 主要研究方向为工业设计、人因工程、机器人人因工程 HFE、机器人人机界面 HRI 以及老龄康复产品可用性设计。

通信作者: 魏玉坤(1991—), 女, 河北人, 天津工业大学硕士生, 主攻工业设计、老龄康复产品可用性设计以及智能产品人因工程。

随着失能老人与残疾人口数量的不断上升,医院、社区及家庭康复训练治疗的负荷不断加大,传统的康复训练效率及康复质量已经不能满足我国日益增长的治疗需求。康复机器人的出现弥补了传统康复治疗方法的不足。它融合了人工智能、机器人学、机械、生物力学、信息科学及康复医学等学科知识,将智能仿生技术用于辅助患者完成肢体训练动作,实现康复治疗目的<sup>[1-2]</sup>,逐渐发展成为医疗机器人领域的一个重要分支,成为学界业界关注焦点。目前,康复机器人的研究与应用集中在脑卒中、脊髓损伤等造成的因神经损伤而引发的肢体障碍患者的辅助治疗<sup>[3]</sup>。

本文将从3个层面对康复机器人的研究与应用状况进行梳理:1)康复机器人的功能分类及交互方式;2)康复机器人的关键技术;3)康复机器人研究应用的发展状况。

## 1 康复机器人功能分类及交互方式

### 1.1 康复训练方式

传统的康复训练方式主要由医护人员、家人帮助患者借助简单器械带动患肢进行辅助训练,由于这类训练方式过多消耗体力,并易受治疗师主观因素影响,所以难以保证康复训练要求的强度、耐力的持久性以及训练效果的规范性<sup>[4]</sup>。康复机器人的出现解决了传统康复方法的不足,提高了康复质量。

康复机器人主要通过被动或者半被动方式协助患者进行训练。康复训练主要通过增强肌力达到康复治疗目的,训练方式分为被动训练、助力训练、主动训练和抗阻训练4种形式,其内部包含一套完整的辅助训练结构与控制系统,通过模拟运算正常人步伐规律及具体数据实时采取患者康复训练方式,再由外骨

骼系统对患者肢体肌肉进行被动锻炼,逐渐恢复大脑运动中枢受损的神经系统,进而帮助患者恢复肢体运动机能<sup>[5-6]</sup>。

### 1.2 康复机器人功能分类

根据肢体训练部位不同,康复机器人分为多体位全身式康复机器人、上肢康复机器人及下肢康复机器人3种类型。其中,外骨骼康复机器人是一种融合传感、控制、信息、融合、移动计算,为患者提供智能化可穿戴机械机构的综合技术<sup>[7-9]</sup>,属于康复机器人的特殊类型。按照运动方式,分为牵引式康复机器人、悬挂式康复机器人及外骨骼康复机器人3种形式;按照患者康复作业姿态类型,分为坐卧式康复机器人、直立式康复机器人及辅助起立康复机器人3种形式;按照结构形式及作业姿态,可分为跑步式步态训练机、脚踏板步态训练机、地面步态训练机、静止步态训练器以及踝关节康复系统5种类型<sup>[10-11]</sup>。

### 1.3 康复机器人交互方式

在治疗过程中,不同结构的康复机器人与患者形成不同的交互方式,如跑步康复训练、步态康复训练、地面步态康复训练、静止步态训练以及足部康复训练等<sup>[12]</sup>,康复机器人人机交互 HRI (Human-Robot Interaction) 方式,见图1。不同作业姿势,又形成不同人机界面 HRI (Human-Robot Interface) 形式,如躺卧式人机界面、悬吊式立姿人机界面、坐姿人机界面,手握式人机界面、外骨骼人机界面以及脚蹬踏人机界面等不同物理界面形式,如康复机器人人机界面,见图2。信息界面是医护人员及患者与康复机器人相互协作、输入或获取视觉信息的显示界面,其目的是以便随时监控治疗效果<sup>[13]</sup>。

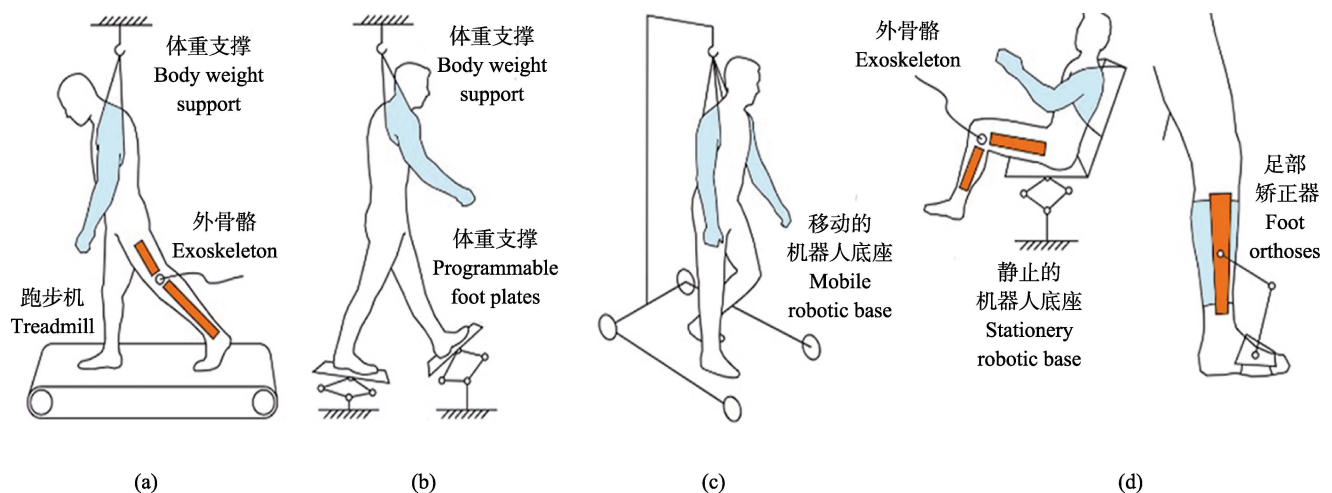


图1 康复机器人 HRI 人机交互方式  
Fig.1 Human-robot interaction mode of rehabilitation robot



图 2 康复机器人 HRI 人机界面  
Fig.2 Human-robot interface of rehabilitation robot

## 2 康复机器人的关键技术

康复机器人是生物机械、信息科学、计算机科学、生物工程、生物医学、人类学、传感技术及人工智能技术高度融合并极其复杂的具有人类生命特征的机器载体。据外文数据库 PubMed, Elsevier, Biological Science Database 中的 210 篇相关文献统计结果, 其关键技术主要涉及关节角度与力矩控制、肌电信息融合感知与控制、力反馈控制、空间运动检测控制等技术。

### 2.1 关节角度与力矩控制技术

关节角度与力矩控制是康复机器人输入控制技术的一种, 它建立在关节角度与关节运动力矩计算技术的基础上, 实时检测患者的肢体运动模式, 帮助患者完成肢体运动, 完成康复任务<sup>[14-15]</sup>。

### 2.2 肌电信息感知与控制技术

研究表明, 肌电电信号能在一定程度上反映神经肌肉的活动状况, 被广泛应用于康复医学、人机工程学、运动科学及生物力学等领域, 是康复机器人关键技术之一<sup>[16]</sup>。它可以依靠表面肌电信号, 并结合关节角度及扭矩、肌肉活动的关系来评估康复绩效<sup>[17]</sup>。如何让康复机器人有效识别患者表面肌电信号, 并快速、精确地进行患者的作业姿势及康复效果的预评估, 及时做出辅助人体患者进行康复运动, 是康复机

器人技术研究的重点。

### 2.3 力反馈控制技术

力反馈是康复机器人应用最广泛的一种关键技术, 柔性力反馈控制能力是目前康复机器人技术研究的重点<sup>[18]</sup>。如何让康复机器人精确感知患者触觉反应, 并根据人体动作力度准确地做出响应, 执行康复训练任务, 是目前康复机器人技术的瓶颈。

### 2.4 空间运动检测技术

空间运动检测控制是康复机器人又一关键技术。它通过空间运动检测技术识别患者动作及其作业姿势特点, 对人体关节位移状态做出准确测量, 从而有规律地帮助患者进行康复运动。

## 3 康复机器人的研究应用发展状况

康复机器人研究可以追溯到 20 世纪 60 年代, 经过 50 多年的研究与探索, 已经取得了一些有价值的研究成果, 并且成功地投放市场服务于人类。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, 荷兰 Exact Dynamics 公司、美国斯坦福大学, 以及瑞士苏黎士联邦工业大学等机构也开始对康复机器人进行研究<sup>[19]</sup>。20 世纪 90 年代, 机器人辅助康复运动出现后, 瑞士 HOCOMA 公司、韩国首尔国立大学、日本东京大学等都已研制出诸如 LOKOMAT, LOKOMAT Pro,

WALKBOT, Hart Walker 等知名品牌, 康复机器人进入到全面发展时期。我国康复事业起步比较晚, 国内大学和一些研究机构在最近几年对康复机器人开始进行相关研究, 也取得了一定成效。

### 3.1 上肢康复机器人

根据结构形式, 上肢康复机器人可以分为末端牵引式康复机器人和外骨骼式康复机器人两种类型<sup>[20]</sup>。上肢康复机器人的研究主题包括肘关节康复训练系

统、手腕手指训练系统、肩膀与肘部训练系统、前臂与手腕训练系统肘部与前臂训练系统以及综合训练系统等, 有些成果已从原型设计阶段走向了产品商业化阶段<sup>[21]</sup>。从 1 自由度到 20 自由度, 肢体运动方式以肘关节屈伸、前臂回转、肩膀内收外展与旋转、手腕旋转以及手指关节屈伸为主。控制输入形式采用关节角度、力扭矩、表面肌电以及力反馈等技术, 制动形式采用直流马达、无刷马达、液压制动以及气动制动, 其关键技术见下表 1。

表 1 上肢康复机器人研究成果中的关键技术  
Tab.1 Technology of upper-limb rehabilitation robot

系统或文献作者	自由度	训练部位	控制输入	机器类型	应用状况
Mavroidis	1	肘关节屈伸	力与扭矩	便携式矫正	原型设计
Pylatiuk	1	肘关节屈伸	表面肌电	可穿戴矫正	原型设计
MRAGES, Winter	5	手指屈伸	运动扭矩	力反馈手套	原型设计
utgers Master	4	手指屈伸	制动传输	力反馈手套	原型设计
TU Beriin	20	所有指关节屈伸	角度扭矩 肌电	可穿戴矫正 辅助抓握	原型设计
MariBot, Rosati	5	肩膀与肘部	关节角度	末端静止系统, 线驱动	NeReBot 机器人原型
Limpact, Stienen	4	肩膀屈伸旋转内收外展	角度扭矩	基于外骨骼静止系统	原型设计
CRAMER, Spencer	3	前臂手腕屈伸外展内收	手加速运动	静止系统 并联机器人	原型设计
Takaiwa	3	前臂手腕屈伸外展内收	关节扭矩	静止系统	原型设计
MAHI, Gupta	5	肘部屈伸, 前臂回转, 手腕收展	关节角度	可穿戴矫正 力反馈技术	MIMERiceWrist 机器人原型
Robotherapist, Furusho	6	肩部、肘部前臂及手腕	终点位置	静止系统	EMUL 机器人原型
Sophia	2	肩部肘部 前臂手腕	终点位置 力反馈	静止系统 平面驱动	Sophia-3 机器人原型

美国的 MIT 麻省理工学院, 斯坦福大学、英国的牛津大学、剑桥大学、帝国理工大学, 以及我国清华大学、中科院自动化研究所、哈尔滨工业大学等工程高校, 在康复机器人的研究方面取得了许多有意义的成果。MIT 机械工程学院人工智能实验室是较早开展康复机器人研究的机构, 在上肢康复机器人领域取得了突破性进展。教授 Neville Hogan 是上肢康复机器人研究的杰出代表。他在 1995 年获得的第一个康复机器人专利 Interactive Robotic Therapist, 是专门针对手腕和手指康复进行设计的。该专利提供了一种手功能康复训练机器人设计原型, 并提出了手功能康复机器人与患者交互训练方法, 见图 3。

上肢康复机器人 MIT-MANUS 是由 MIT 教授 Neville Hogan 团队于 1998 年研发成功, 该款机器人利用重力补偿方式, 为了提高良好的反向驱动性能, 采用并联机构实现二自由度的平面康复运动, 帮助患者进行肩肘关节康复训练。相比外骨骼式的上肢康复机器人, MIT-MANUS 这种执行末端运动为轨迹较简单的二维平面运动模式, 与日常活动中人体上肢复杂

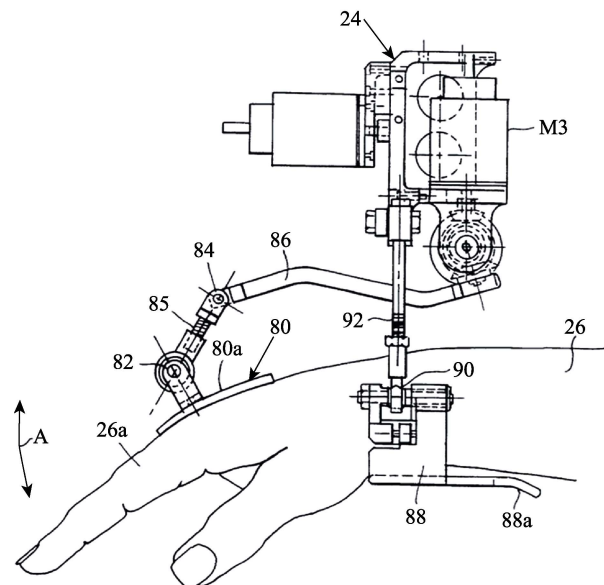


图 3 麻省理工学院 Neville Hogan 教授的  
手腕康复机器人专利

Fig.3 The patent of wrist rehabilitation robot from  
MIT's professor Neville Hogan

运动的相合性较差<sup>[22-23]</sup>。

MIT 新人实验室 Newman-Lab 是教授 Neville Hogan 领导的以康复医疗和生物机械为目标的在国际康复机器人领域具有领先地位的研究机构。其以提高人类作业能力,以人类运动操作中的触觉感知为基础,开发能超越人类的康复新技术,自 1976 年建立以来,MIT 新人实验室 Newman-Lab 取得了很多成果。

斯坦福大学工程学院康复工程实验室 CharmLab 是可穿戴式外骨骼下肢康复机器人研究的开拓者之一。根据大学 2018 年 2 月公布的最新研究进展,触觉与姿态界面系统是康复工程实验室正在开发的一款可穿戴上肢康复机器人。HAPI 在一个静态平台的技术上,通过微软广角摄像头,利用空间检测技术,检测可穿戴式康复训练设备的 3D 人体关节的空间运动特点,利用 15 个自由度的人体运动感应器实时记录胳膊运动时的位置信息,捕获人体姿势。

### 3.2 下肢康复机器人

下肢康复机器人是针对下肢功能障碍开发的智能化康复医疗设备,它可以帮助患者进行强化步态训练,使因脑神经受损导致的功能障碍患者恢复正常行走功能。经过文献检索分析的不完全统计,共有 40 余款下肢康复机器人。例如 Lokomat 下肢康复机器人,见图 4。该机器人由瑞士苏黎世联邦理工学院与 HOCOMA 医疗器械公司联合研发,它是第一套可辅助患者在医用跑步台上自动减重的外骨骼式下肢康复机器人,以脑功能重塑理论为基础,提供符合人体生理特征的步态训练模式。计算机控制集成在每个髋关节和膝盖中,利用电机驱动器,确保步态矫正器的速度与跑步机之间的精确匹配<sup>[24]</sup>。

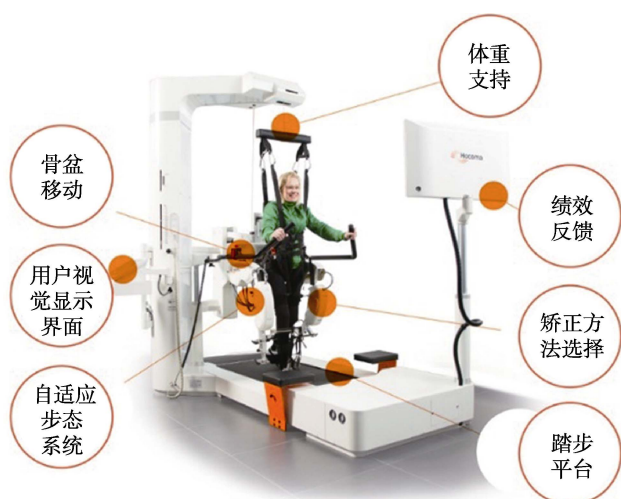


图 4. Lokomat 康复机器人  
Fig.4 Lokomat rehabilitation robot

Motomed 是德国生产的一款拥有目前技术先进的康复评估专家系统并集聚上下肢同时训练功能的康复机器人。它可以通过电机驱动与人力自主进行助

力训练,完全依靠人力或外力的主动训练、以及完全依靠电机驱动的被动训练。机身配备的痉挛控制系统,可持续感应患者痉挛信号,有效减少痉挛的发生。Motion Maker 是由瑞士 Swortec 公司设计研发的世界第一台使用功能性电刺激与控制锻炼协同治疗的康复训练机器人。在固定训练系统辅助下,患者可以在卧床状态时控制瘫痪肢体进行健身运动,利用预先确定的算法同步序列电刺激,模拟自然地面反作用力,将患者肢体附着在脚部矫形器上,由传感器实时反馈信号来控制练习模式及速率等。

## 4 康复机器人 HRI 人机界面设计中存在的问题及挑战

尽管学界已经取得了很多有意义的研究成果,但因其技术要求高、学科跨度广,康复机器人研究仍然面临着诸多挑战性问题。

### 4.1 人机交互安全挑战性问题

除输入输出控制、路径规划及关节运动匹配度等因素外,还涉及机器人与患者在交互作业过程中的心理感受、主观意识以及偏好等诸因素。良好的人机交互有助于促进患者康复训练效果的提升,人机交互安全性问题是康复机器人帮助患者进行康复训练的最基本要求,也是目前康复机器人设计中存在的主要问题之一。

### 4.2 人机工程设计挑战性问题

目前,关于康复机器人的研究主要集中在智能控制、生理信号获取以及模拟算法等关键领域,却往往忽视了人机工效学因素,具体表现在以下几个方面:由于结构、尺度以及界面设计的缺陷,造成康复作业者作业姿势不能很好地处于自然状态,导致危险事故发生;由于结构及材料限制,可穿戴机器人操作流程复杂及自重等问题使得康复作业难度加大,患者不能自主操作训练,导致大量人力、物力的浪费;辅助性操作程序过多,患者很难充分发挥其主观意识,加大了操作负荷;现有的康复器材大多出自国外,尺寸和习性并不十分符合中国大众的需求;康复机器人作业姿势与患者自然活动作业姿势的相合性问题。

### 4.3 人机界面设计挑战性问题

良好的人机界面 HRI 是提高康复机器人作业绩效的关键。在训练过程中,康复机器人面对的直接用户是患者,因此,应考虑患者在康复训练过程中的主观感受及生理反应,尤其是康复机器人的视觉感知特性。目前,康复机器人 HRI 人机界面的可用性设计还存在诸多问题。如何在帮助患者实现康复目的前提下,使康复机器人具备情感化特征,让患者获得心情愉快的体验设计,是未来康复机器人发展的挑战及趋势。

## 5 结论

基于学界及产业界康复机器人研究与应用状况的系统梳理, 本文从功能分类、交互方式、关键技术方面对康复机器人进行了系统分析, 并从人机交互安全性、人机工程设计以及人机界面设计问题层面提出了当前康复机器人设计中存在的问题及挑战, 指出了康复机器人未来的发展趋势。

### 参考文献:

- [1] YH KIM. Robot-assisted Therapy in Stroke Rehabilitation[J]. *Journal of Stroke*, 2013, 15(3): 174—181.
- [2] 史小华. 坐/卧式下肢康复机器人研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2014.  
SHI Xiao-hua. Sit/Lie Lower Limb Rehabilitation Robot Research[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2014.
- [3] 侯增广, 赵新刚, 程龙, 等. 康复机器人与智能辅助系统的研究进展[J]. *自动化学报*, 2016, 42(12): 1765—1779.  
HOU Zeng-guang, ZHAO Xin-gang, CHEGN Long, et al. Recent Advances in Rehabilitation Robots and Intelligent Assistance Systems[J]. *Acta Automatica Singca*, 2016, 42(12): 1765—1779.
- [4] 李宏伟, 张韬, 冯焱娟, 等. 外骨骼下肢康复机器人在脑卒中康复中的应用进展[J]. *中国康复理论与实践*, 2017, 23(7): 788—791.  
LI Hong-wei, ZHANG Tao, FENG Yao-juan, et al. Application of Exoskeleton-based Lower Limb Rehabilitation Robot in Stroke Rehabilitation[J]. *Chinese Journal of Rehabilitation Theory and Practice*, 2017, 23(7): 788—791.
- [5] 倪自强, 王田苗, 刘达. 医疗机器人技术发展综述[J]. *机械工程学报*, 2015, 51(13): 45—52.  
NI Zi-qiang, WANG Tian-miao, LIU Da. Survey on Medical Robotics[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(13): 45—52.
- [6] 胡进, 侯增广, 陈翼雄, 等. 下肢康复机器人及其交互控制方法[J]. *自动化学报*, 2014, 40(11): 2377—2390.  
HU Jin, HOU Zeng-guang, CHEN Yi-xiong, et al. Lower Limb Rehabilitation Robots and Interactive Control Methods[J]. *Acta Automatica Singca*, 2014, 40(11): 2377—2390.
- [7] CHANG H, KIM G. Robot-assisted Therapy in Stroke Rehabilitation[J]. *Journal of Stroke*, 2013, 15(3): 174—181.
- [8] 明东, 蒋晟龙, 王忠鹏, 等. 基于人机信息交互的助行外骨骼机器人技术进展[J]. *自动化学报*, 2017, 43(7): 1089—1100.  
MING Dong, JIANG Sheng-long, WANG Zhong-peng, et al. Review of Walk Assistant Exoskeleton Technology: Human-machine Interaction[J]. *Acta Automatica Singca*, 2017, 43(7): 1089—1100.
- [9] CHEN G. A Review of Lower Extremity Assistive Robotic Exoskeletons in Rehabilitation Therapy[J]. 2013, 41(4): 343—363.
- [10] 周媛, 王宁华. 康复机器人概述[J]. *中国康复医学杂志*, 2015, 30(4): 400—403.  
ZHOU Yuan, WANG Ning-hua. Summary of Rehabilitation Robot[J]. *Chinese Journal of Rehabilitation Medicine*, 2015, 30(4): 400—403.
- [11] RAEII T H. Current and Emerging Robot-Assisted Endovascular Catheterization Technologies: A Review[J]. *The Journal of the Biomedical Engineering Society*, 2014, 42(4): 697—715.
- [12] IÑAKI DÍ. Lower-Limb Robotic Rehabilitation: Literature Review and Challenges[J]. *Journal of Robotics*, 2011: 1—11.
- [13] HERNANDEZ V. Human Upper-limb Force Capacities Evaluation with Robotic Models for Ergonomic Applications: Effect of Elbow Flexion[J]. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 2015: 1—10.
- [14] 谭民, 王硕. 机器人技术研究进展[J]. *自动化学报*, 2013, 39(7): 963—972.  
TAN Min, WANG Shuo. Research Progress on Robotics[J]. *Acta Automatica Singca*, 2013, 39(7): 963—972.
- [15] RAEII T H. Current and Emerging Robot-Assisted Endovascular Catheterization Technologies: A Review[J]. *The Journal of the Biomedical Engineering Society*, 2014, 42(4): 697—715.
- [16] 孙睿, 宋嵘, 汤启宇. 肌电控制康复机器人协助的脑卒中患者肘关节康复训练的多参数评价[J]. *中国康复医学杂志*, 2012, 27(9): 802—807.  
SUN Rui, SONG Rong, TANG Qi-yu. Quantitative Evaluation of Motor Function Recovery Process in Chronic Stroke Patients During Myoelectric Controlling Robot-assisted Elbow Training[J]. *Chinese Journal of Rehabilitation Medicine*, 2012, 27(9): 802—807.
- [17] A C L. Robot-Assisted Therapy for Long-Term Upper-Limb Impairment after Stroke[J]. *New England Journal of Medicine*, 2010, 362(19): 1772—1783.
- [18] 周宇轩. 基于通信原理与肌电信号控制的上肢运动功能重建系统设计与实验研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.  
ZHOU Yu-xuan. Based on the Communication Principle and the Upper Limb Movement Function Reconstruction of the Electromyographic Signal Control System Design and Experimental Research[J]. *Dongnan University*, 2016.
- [19] 李世远, 李双鲲, 高翔, 等. 基于力反馈的上肢康复机器人[J]. *齐齐哈尔大学学报*, 2015, 31(1): 28—31.  
LI Shi-yuan, LI Shuang-kun, GAO Xiang, et al. Rehabilitation Robot[J]. *Journal of Qiqihaer University*, 2015, 31(1): 28—31.
- [20] 李光林, 郑悦, 吴新宇, 等. 医疗康复机器人研究进

- 展及趋势[J]. 中国科学院院刊, 2015, 30(6): 793—802.
- LI Guang-lin, ZHENG Yue, WU Xin-yu, et al. State of the Art of Medical and Rehabilitation Robotics and Their Perspective[J]. Bulletin of Chinese Academy of Science, 2015, 30(6): 793—802.
- [21] 杨启志, 曹电锋, 赵金海. 上肢康复机器人研究现状的分析[J]. 机器人, 2013, 35(5): 630—640.
- YANG Qi-zhi, CAO Dian-feng, ZHAO Jin-hai. Analysis on State of the Art of Upper Limb Rehabilitation Robots[J]. Robot, 2013, 35(5): 630—640.
- [22] KIM G. Is Robot-assisted Therapy Effective in Upper Extremity Recovery in Early Stage Stroke? A Systematic Literature Review[J]. Journal of Physical Therapy Science, 2017, 29(6): 1108—1112.
- [23] 刘恩辰, 梁蔓安. 上肢康复机器人研究进展康复工程[J]. 中国康复理论与实践, 2014, 20(09): 895—897.
- LIU En-chen, LIANG Man-an. Advance in Upper Limb Rehabilitation Robot[J]. Chinese Journal of Rehabilitation Theory and Practice, 2014, 20(9): 895—97.
- [24] 魏玉坤. 基于人机工程的下肢康复训练机器人可用性设计研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2018.
- WEI Yu-kun. Usability Design of Lower LIMb Rehabilitation Robot Based on Ergonomics and Human Factors[D]. Tianjin: Tianjin Polytechnic University, 2018.