

一种新的康复与代步外骨骼机器人研究

黄高^{1,4,5} 张伟民^{1,2,4,5} Marco Ceccarelli^{2,6} 余张国^{1,2,4,5}
陈学超^{1,2,4,5} 孟非^{1,2,4,5} 黄强^{1,2,3,4,5}

摘要 针对老年人及下肢障碍者康复训练与代步问题, 本文提出一种新的康复与代步外骨骼机器人. 本文首先详细介绍了机器人各部分组成及机构设计方案, 通过下肢外骨骼与轮椅的有机结合, 有效保持或恢复老年人、脑卒中患者下肢运动能力的同时, 为患者提供一种方便的代步工具; 运用脚踏车运动制订康复训练策略, 可保持下肢康复训练轨迹固定, 保证患者安全; 提出主从式操作方法及多模态康复训练控制流程提高使用者参与感. 最后通过仿真与实验验证了所提康复系统的可行性与设计的正确性.

关键词 康复机器人, 外骨骼, 机构设计, 仿真, 实验

引用格式 黄高, 张伟民, Marco Ceccarelli, 余张国, 陈学超, 孟非, 黄强. 一种新的康复与代步外骨骼机器人研究. 自动化学报, 2016, 42(12): 1933–1942

DOI 10.16383/j.aas.2016.c160180

Research of a New Rehabilitation and Assisting Robot

HUANG Gao^{1,4,5} ZHANG Wei-Min^{1,2,4,5} MARCO Ceccarelli^{2,6} YU Zhang-Guo^{1,2,4,5}
CHEN Xue-Chao^{1,2,4,5} MENG Fei^{1,2,4,5} HUANG Qiang^{1,2,3,4,5}

Abstract Towards the rehabilitation and training problems of older persons and lower limb disabilities, the paper proposes a new robot with lower limb exoskeleton for rehabilitation and walking assistance. The components and mechanical design of the robot are introduced in detail. Through the function combination of lower limb exoskeleton and wheelchair, the robot can help the users to maintain the lower limb movement effectively and provide them with a convenient tools for movement. The pedal-actuated motion training strategy can ensure the safety of users. The master-slave operational mode is put forward with multimodal rehabilitation training process control. Correctness and feasibility of the rehabilitation system are validated by computer simulation and experiment.

Key words Rehabilitation robot, exoskeleton, mechanical design, master-slave operational flow, simulation

Citation Huang Gao, Zhang Wei-Min, Marco Ceccarelli, Yu Zhang-Guo, Chen Xue-Chao, Meng Fei, Huang Qiang. Research of a new rehabilitation and assisting robot. *Acta Automatica Sinica*, 2016, 42(12): 1933–1942

收稿日期 2016-03-03 录用日期 2016-10-14
Manuscript received March 3, 2016; accepted October 14, 2016
国家高技术研究发展计划 (863 计划) (2014AA041602, 2015AA042305, 2015AA043202), 国家自然科学基金 (61320106012, 61375103, 61533004, 61273348, 61321002, 61673069), 国际科技支撑计划 (2015BAF13B01, 2015BAK35B01), 北京市科技计划项目 (D161100003066002, Z161100003116081), 国家 111 引智计划 (B08043)
Supported by National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2014AA041602, 2015AA042305, 2015AA043202), National Natural Science Foundation of China (61320106012, 61375103, 61533004, 61273348, 61321002, 61673069), Key Technologies Research and Development Program (2015BAF13B01, 2015BAK35B01), Beijing Municipal Science and Technology Project (D161100003066002, Z161100003116081), the National "111" Project (B08043)

本文责任编辑 王启宁
Recommended by Associate Editor WANG Qi-Ning
1. 仿生机器人与系统教育部重点实验室 北京 100081 中国 2. 智能机器人与系统高精尖创新中心 北京 100081 中国 3. 复杂系统智能控制与决策国家重点实验室 北京 100081 中国 4. 北京理工大学机电学院智能机器人研究所 北京 100081 中国 5. 仿生机器人与系统教育部国际合作联合实验室 北京 100081 中国 6. 意大利卡西诺大学机器人与机电系统实验室 卡西诺 03043 意大利

1. Key Laboratory of Biomimetic Robots and Systems (Beijing Institute of Technology), Ministry of Education, Beijing 100081,

随着我国经济发展和医疗水平的提高, 人均寿命不断提高, 随之而来的人口老龄化问题日益突出. 《中国老龄事业发展报告 (2014)》显示, 截至 2014 年底, 我国 60 岁以上老年人口数量达 2.12 亿, 占总人口的 15.5%, 失能老人超过 3800 万人; 到 2025 年前, 我国高龄老年人口将保持年均 100 万的增长态势^[1]. 身体机能退化和疾病容易导致严重的运动障碍, 不仅影响老年人的身体健康, 而且需要大量的劳动人员负担照顾、护理工作, 增加了社会和患者家庭的负担. 另一方面, 据《中国脑卒中防治报告 (2015)》显示, 脑卒中患病率呈上升趋势, 到 2030

China 2. Beijing Advanced Innovation Center for Intelligent Robots and Systems, Beijing 100081, China 3. Key Laboratory of Intelligent Control and Decision of Complex System, Beijing 100081, China 4. Intelligent Robotics Institute, School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China 5. International Joint Research Laboratory of Biomimetic Robots and Systems (Beijing Institute of Technology), Ministry of Education, Beijing 100081, China 6. Laboratory of Robotics and Mechatronics DICeM, University of Cassino and South Latium Via Di Biasio, Cassino (Fr) 03043, Italy

年,中国将有 3 177 万脑卒中病人^[2]. 脑卒中引起的下肢障碍如果缺乏后续康复治疗和训练,将会导致肌肉萎缩、溃乱甚至人体相关机能丧失,将严重影响脑卒中患者以及家人的生活质量. 因此,安全可靠、患者易接受的康复训练与代步工具研究对老年人与下肢障碍患者的康复与锻炼具有十分重要的意义.

机器人在稳定性、重复性方面有先天的优势,适宜作为养老助残设备使用^[3]. 近年来,机器人技术突飞猛进,医疗康复类机器人也得到充分发展,康复机器人系统相继涌现出来^[4-6]. 下肢康复机器人大致分为以下 4 大类:坐卧式机器人、直立式机器人、辅助起立式机器人和多体位式机器人^[7]. 脚踏车运动因为其自身拥有的闭环运动特点及轨迹固定、单自由度即可实现下肢各关节运动的特点,受到康复设备研发人员青睐^[8]. 如美国 Restorative Therapies 开发的 RT300 Leg^[9] 和德国 RECK-Technical GmbH & Co. KG 的 MOTOMed^[10],均运用脚踏运动及功能性电刺激(Functional electrical stimulation, FES),实现运动的同时,结合 FES 的康复策略. 上述种类的康复设备只能使患者在原地进行康复训练,没有代步功能,训练过程比较单调乏味;同时这类坐卧式康复训练设备大多是被动的方式进行康复锻炼,不易被患者接受,在一定程度上可能影响康复效果. 众所周知,轮椅是中风偏瘫患者和老人不可或缺的代步工具,康复轮椅亦是研究热点^[11-14];日本 Yasunobu Handa 公司研发的 Profhand 很好地利用代步的同时进行康复训练^[15-17],可以使患者很好地参与到康复训练过程中,提升了患者康复训练的意愿. 但是该设备没有助力系统,不适宜于病情严重的患者;同时对肢体没有很好的保护,腿脚麻木的患者在康复训练过程中有折断的风险.

外骨骼作为辅助与助力设备也广泛用于康复机器人中. ReWalk 是美国 Argo Medical Technology 公司开发生产的可穿戴式外骨骼康复机器人,下肢障碍患者可穿上该外骨骼进行运动训练,患者可以通过手柄控制行走速度^[18-19]. 该机器人使用倾角传感器检测患者上身所处的姿态,以此来推断下肢的运动状态,从而辅助患者完成步行和上下楼梯等日常活动^[20]. 日本筑波大学研制的 Hybrid assistive limb (HAL) 不仅可以帮助患者完成康复活动,而且可以支撑患者^[21-22]. 国内的很多高校及科研院所也开展了外骨骼康复机器人相关的研究,如中科院自动化所^[23-24]、河北工业大学^[25]、浙江大学^[26]、哈尔滨工业大学^[27]、燕山大学^[28]、北京理工大学^[29]等均取得相关研究成果. 外骨骼既可以用来为患者康复提供助力与支撑,同时还可以在康复过程中检测与执行康复策略,因此在康复医疗中得到广泛应用,本文提出的康复与代步机器人亦是利用下肢外骨骼完成康复过程.

针对康复轮椅与外骨骼机器人各自的特点,本文提出一种新的康复与代步下肢外骨骼机器人及相关的主从式操作方法,通过具有力反馈脚踏的方式提升患者在康复训练过程中的参与感,以易被接受的方式对下肢运动障碍患者进行康复训练,在有效保持或恢复老年人、脑卒中患者下肢运动能力的同时,为患者提供一种方便的代步工具,降低纯电动轮椅出行方式给患者带来的恐惧心理,同时利用单自由度闭链式外骨骼机构提供必要助力并保证使用者的安全,为老年人、脑卒中患者基本生活服务提供便利. 通过外骨骼的助力与康复作用高效地弥补轮椅不能为用户提供康复锻炼需求的缺陷. 本文所提出的机器人可同时满足使用者康复与代步需求,据作者所知,目前还没有此类的康复设备.

本文章节安排如下:第 1 节首先描述人类脚踏车特点、过程及在康复运动中的应用等,在此基础上提出动力学简图与详细机构设计方案并给出相关设计参数;第 2 节描述了该机器人主从式控制器及该机器人操作流程;第 3 节对外骨骼系统进行初步仿真并验证了设计的可行性;第 4 节根据设计完成了样机研发并进行相关实验验证;文章最后给出了总结并提出展望.

1 康复与代步机器人运动学简图及机构设计

1.1 脚踏车运动特点

脚踏车运动以其独有的特点受到越来越多的关注,使用者可借助曲柄的动作完成锻炼与康复活动,因此受到研究者的青睐. 在脚踏车运动过程中,腿部各块肌肉以相互协调的方式产生和传递来自身体的力量,使下肢各关节肌肉得到很好的锻炼. 脚踏车下肢康复机器人的设计,建立在认识脚踏车运动特点基础上. 如图 1 所示,脚踏车运动可分为三个阶段:推力阶段、加速阶段与回程阶段^[30]. 在上下推力阶段,需要控制曲柄速度,主要是利用惯性通过图中的上下死点,此时可不使用推力但是需要控制好曲柄速度;加速阶段是单边腿部各部分肌肉锻炼的重要阶段,此时为通过推力阶段的上下死点做相应准备;回程阶段是单边腿部肌肉放松阶段,通过下死点后,左右腿交换进行加速阶段和回程阶段. 因此脚踏车运动是左右腿相互协作的周期性过程.

从上述脚踏车的描述可以看出,对特定的曲柄,其运动轨迹为单一的闭链曲线,可保证使用者下肢在一个平面内运动,能避免麻木的下肢康复过程中左右摆动产生二次伤害;同时,在一个周期中,其运动特点有章可循,可在一个周期中不同的阶段对曲柄施加所需的力矩,使用者感觉舒适的同时,控制相对简单,且能保证系统运行平稳. 因此,使用脚踏车运动的康复与代步方式,可保证康复训练与代步机器人的安全性与可靠性.

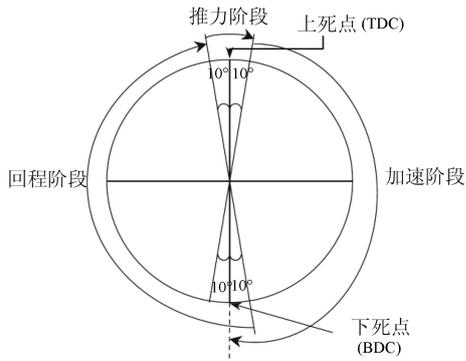


图 1 脚踏车运动一个周期中三阶段分布
Fig. 1 Three phases of the crank cycle during the cycling action

1.2 康复与代步机器人运动学结构简图

人体下肢单腿自由度分布为: 髋关节 3 个自由度, 膝关节 1 个自由度, 踝关节 3 个自由度, 其中矢平面内髋、膝、踝关节各有一个自由度, 依据解剖学可知下肢关节矢平面的运动可有效锻炼下肢各关节肌肉^[31], 因此本外骨骼康复机器人主要针对矢平面三个自由度对患者进行康复训练. 根据脚踏车运动特点及下肢康复训练需求, 本设计选用曲柄摇杆机构设计康复外骨骼为使用者下肢提供支撑. 其运动简图及相关设计参数如图 2 所示, 其中 R_2, R_3, R_4 分别表示髋关节、膝关节、踝关节受力大小, $\theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_p, \theta_w, \theta_{sw}$ 分别表示髋关节、膝关节、踝关节、曲柄、轮椅后轮与前轮旋转角度, L_2, L_3, L_4 表示摇杆、连杆与曲柄的长度, L_1 表示轮椅前后轮之间的间距. 由曲柄摇杆机构特性及本运动简图可知:

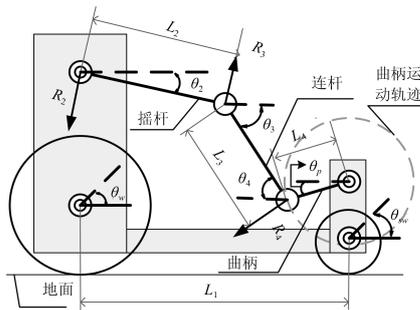


图 2 外骨骼康复机器人运动简图及设计参数
Fig. 2 A kinematic sketch of proposed leg-exoskeleton assisted wheelchair system and its main design parameters

$$\theta_p = 2 \arctan \frac{B \pm \sqrt{A^2 + b^2 - C^2}}{A - C} \quad (1)$$

其中, $A = L_4 - L_2 \cos \theta_2, B = -L_2 \sin \theta_2,$

$$C = \frac{A^2 + B^2 + L_3^2 - L_2^2}{2L_3}$$

由此可根据需要建立驱动电机与各关节旋转角度之间的函数关系.

为了使机器人更安全柔顺地完成康复工作, 操作不宜过于复杂, 满足康复条件的情况下尽量减少主动自由度. 根据四连杆机构特点, 本康复机器人自由度分布如图 3 所示, 该机器人包含两个主动自由度及 8 个被动自由度. 外骨骼主动电机主要针对使用者下肢的康复运动, 可通过对主动电机的控制完成从完全主动康复到完全被动康复的不同康复模式, 通过单自由度即可实现康复机器人的康复功能. 轮椅从动电机用来控制轮椅自身的运动, 通过两个从动电机的配合, 实现轮椅的前进、后退、转弯等, 实现康复机器人的代步功能.

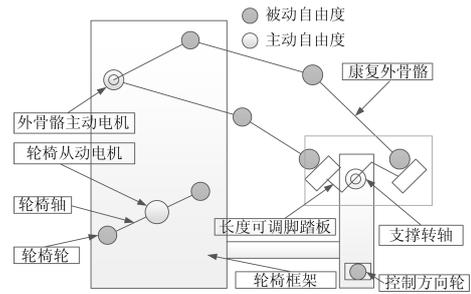


图 3 康复机器人自由度分布
Fig. 3 The distribution of the robot's degrees of freedom (DOFs)

1.3 康复与代步机器人机构设计

根据康复机器人运动简图与自由度分布情况, 图 4 描述了该机器人的机构设计方案. 该机器人主要分成轮椅与外骨骼两大部分; 其中轮椅操作面板上固定有轮椅操作杆, 用来控制轮椅的运动方向与速度; 同时固定了各类按钮, 包括不同康复模式设置按钮、急停开关等; 系统的信号指示灯固定在轮椅操作面板上; 外骨骼电机及曲柄摇杆机构均固定在轮椅上, 构成四连杆机构. 足底传感器用来监测人体运动意图, 控制机器人康复运动与轮椅的启停. 图 5 中, 外骨骼大、小腿连杆连接处做成槽型结构, 连杆长度 L 可根据不同使用者腿部长度沿图 5 中箭头方向进行相应手动调整; 该外骨骼设计长度可以满足大部分亚洲成年人身高需求^[32]. 图 5 中的异形拱可有效避开轮椅与外骨骼的干涉, 最大限度地提高关节活动范围. 各部分详细设计参数如表 1 所示, 其中, $\theta_2, \theta_3, \theta_4$ 的活动范围分别为 $-15^\circ \sim 15^\circ, -5^\circ \sim 35^\circ, 0^\circ \sim 35^\circ$, 该关节活动范围可有效地锻炼使用者各关节肌肉^[33].

针对外骨骼康复机构, 由于大部分关节均是旋转关节, 因此需要保证旋转时关节的精度. 图 6 所示为外骨骼大部分关节的连接方式. 此关节的剖面图位置为图 4 中 I 处, 通过法兰轴与轴承的结合实现电机与外骨骼的关节传动. 同时, 对于脚踏板 (图 4

中关节 II 处), 一方面需要连接外骨骼传递蹬踩自行车运动, 另一方面需要与脚蹬连接, 因此采用 3 轴承支撑机构设计方案; 在装配过程中, 预留的扳手槽用于完成图示转动轴与脚蹬的螺纹连接, 详细机构设计如图 7 所示.

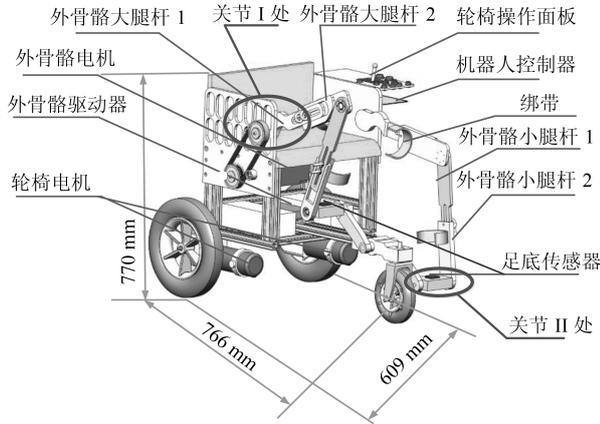


图 4 机器人机构设计方案
Fig. 4 The mechanical design of the robot

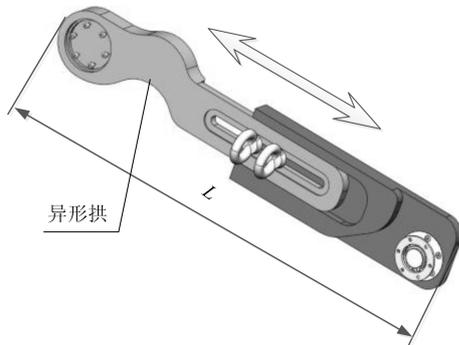


图 5 外骨骼长度调节连杆
Fig. 5 The length adjustment of the exoskeleton rod

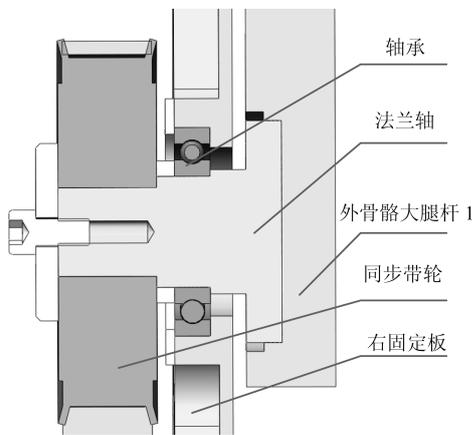


图 6 同步带轮关节机构设计
Fig. 6 The mechanical design of synchronous pulley

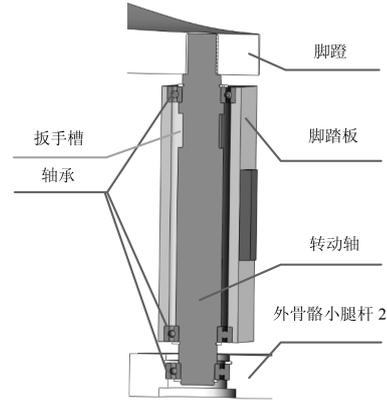


图 7 脚踏板关节机构设计
Fig. 7 The mechanical design of pedal

该机器人使用前准备过程为, 首先利用轮椅电机抱闸固定轮椅, 使用者坐上轮椅后, 通过调整大小腿杆 1 与 2 的相对位置, 根据需要手动调整大腿及小腿外骨骼长度 (如图 5 所示), 拧紧碟形螺栓, 将使用者双腿与外骨骼通过图示绑带相连, 并手握轮椅操作器, 打开电机抱闸, 准备康复锻炼.

表 1 外骨骼机器人机构设计参数

Table 1 Specifications of the new leg-exoskeleton assisted wheelchair

设计参数	数值
自由度	2
机器人重量 (kg)	55
高度 (mm)	800
长度 (mm)	780
宽度 (mm)	609
轮椅运行速度 (m/s)	1 ~ 3
θ_2 ($^\circ$)	-15 ~ 15
θ_3 ($^\circ$)	-5 ~ 35
θ_4 ($^\circ$)	0 ~ 35
L_2 (mm)	380 ~ 430
L_3 (mm)	370 ~ 420

2 康复与代步机器人主从式操作方法

为提高患者康复运动过程的参与感, 消除其对医疗器械的恐惧心理, 本机器人采用主从式控制方法. 如图 8 所示为康复轮椅主从式操作方法示意图. 图 8 中, 所有运动均从人体运动意图开始, 使用者脚踏轮椅踏板时, 安装在脚底的力传感器接收到人体运动意图, 同时触发外骨骼运动与轮椅运动; 对于外骨骼运动, 可通过腿部传感器的作用控制使用者康复训练; 对于轮椅运动, 可通过使用者本人控制轮椅的前进、后退与转弯运动. 因此, 本机器人不仅可以使患者充分地参与到康复训练中, 而且还可以同时实现康复与代步两项功能. 为实现上述功能, 本机器

人设计的主从式控制器如图 9 所示, 主要包括控制面板、主控制器、轮椅驱动控制器、外骨骼电机驱动器、电机及相关力传感器等几大部分组成, 其中, 主控制器接收到来自使用者控制面板的操作和脚底及下肢力传感器的信号, 根据用户的功能选择与外骨骼信号反馈, 实时规划外骨骼电机及轮椅两个驱动器运动数据; 分别通过控制轮椅左右电机实现轮椅的转速与运动方向, 通过外骨骼位置与扭矩控制外骨骼伺服运动并利用反馈控制外骨骼电机, 指导使用者进行相关的康复辅助锻炼.

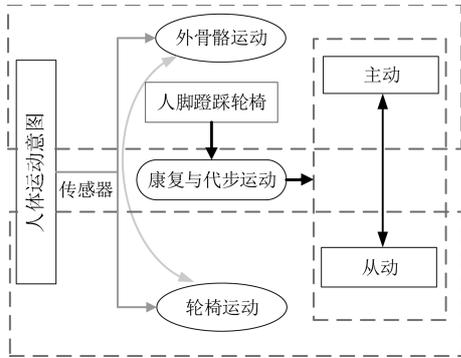


图 8 康复轮椅主从式操作方法示意图

Fig. 8 A scheme for the slave-master actuation for the robot

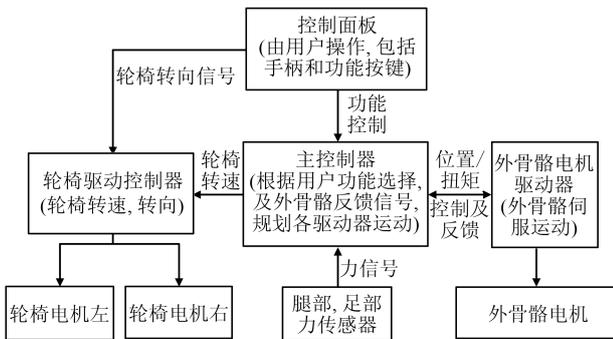


图 9 主从式控制器组成

Fig. 9 The components of slave-master controller

为实现上述康复轮椅主从式操作方法及主从式控制器的设计, 该机器人康复训练控制流程如图 10 所示. 使用者脚蹬轮椅时, 外骨骼和轮椅控制器分别检测力传感器中力的大小, 根据设定分别执行各自任务; 对于轮椅, 可根据力的大小控制轮椅前进、后退、转弯速度, 对于外骨骼, 根据力度大小及下肢力传感器检测数据判断使用者是否有足够力量完成脚蹬车运动, 该过程可通过比例系数 K ($K \geq 0$) 值来表示. 如果力量不够 ($K = 0$), 可通过控制电机, 带助人腿完成康复训练, 此时为完全被动康复训练; 如果人体下肢力量足够 ($K \geq 1$), 则外骨骼只辅助人腿运动不提供助力, 必要时还可以通过电机反转提供部分阻力供使用者锻炼, 此时为完全主动训练状

态; 当使用者下肢有部分力量但是不足以自己完成脚蹬车运动时 ($0 < K < 1$), 此时可为患者提供部分助力, 此时为主被动融合的康复模式; 同时脚蹬车运动的速度与轮椅行进的速度之间包含正相关的反馈调节, 即使用者脚蹬车越快, 轮椅前进速度越快, 反之亦然, 使用者脚蹬车停止, 轮椅停止运动, 由此让使用者感觉到是自己蹬车前进的, 切实提升使用者参与感. 该过程可通过如下公式表示:

$$F_r = (1 - K)\Delta F_m + K\Delta F_u, \quad 0 \leq K \quad (2)$$

其中, F_r 为康复运动过程所需力的大小, ΔF_m 为康复电机提供的力的大小, ΔF_u 为患者腿部提供的力的大小. 由此可见, 该康复运动过程是人机相互协调运动控制的结果.

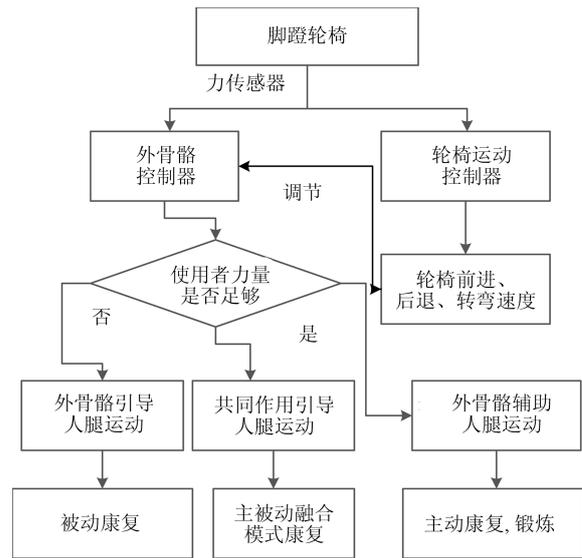


图 10 机器人康复训练控制流程

Fig. 10 The robot's control flow for the rehabilitation training

3 仿真分析

本文针对外骨骼部分进行初步的运动学分析. 将 Solidworks 软件设计的三维模型导入 Adams 中进行仿真分析, 初始条件参数设置如表 2 所示, 主要包括系统质量与速度参数和外骨骼关节摩擦相关参数. 其中, 在仿真环境中, 为充分考虑人体质量对仿真结果的影响, 人体的质量 60 kg 按照人体质量比例分布到仿真模型中人体各部分中, 以保证仿真结果的正确性与严密性; 同时, 仿真设置中, 将大、小腿分别与外骨骼大小腿杆固定相连; 仿真环境中各旋转关节设置如图 11 所示. 为验证外骨骼各连杆参数的正确性, 初始输入条件为曲柄的速度为 30 RPM, 因此一个周期时间为 2s, 运行仿真时间 20s, 选取比较稳定的阶段 14s~18s 作为仿真结果, 如图 12~14 所示.

图 12 所示为 2 周期内左右腿髋关节、膝关节、踝关节角度曲线, 由图 12 可知, 外骨骼系统运行平滑, 髋关节、膝关节、踝关节角度范围分别大约为: $-13^{\circ} \sim 12^{\circ}$, $-4^{\circ} \sim 32^{\circ}$, $0^{\circ} \sim 32^{\circ}$, 角度的正负值取决于仿真环境中的世界坐标值, 结果基本与设计参数吻合, 误差存在于身高参数设置的不同; 同时该参数会根据不同身高有些差异.

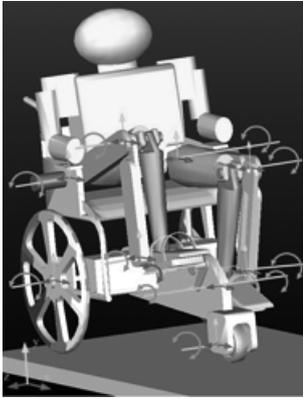


图 11 ADAMS 环境中机器人与人的模型及各旋转关节示意

Fig. 11 An ADAMS model of the design in Fig. 4 with indication of parameters

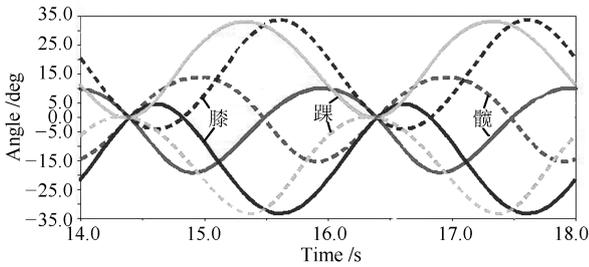


图 12 左右腿髋关节、膝关节、踝关节角度曲线 (实线为左腿, 虚线为右腿)

Fig. 12 Angle curves of left and right legs at hip, knee, ankle (continuous line is for left foot and dot line is for right foot)

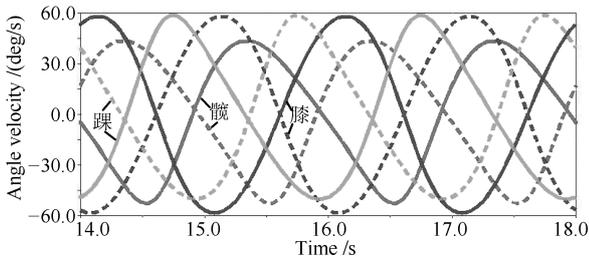


图 13 左右腿髋关节、膝关节、踝关节角速度曲线 (实线为左腿, 虚线为右腿)

Fig. 13 Angular velocities of left and right legs at hip, knee, ankle (continuous line is for left foot and dot line is for right foot)

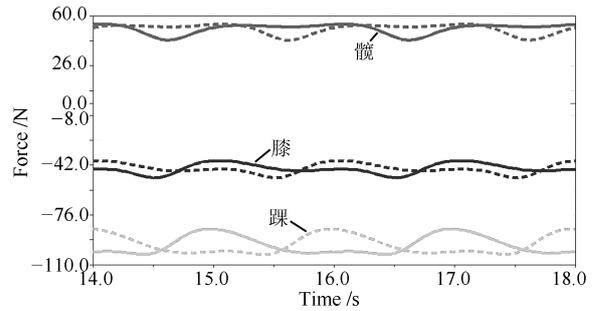


图 14 左右腿髋关节、膝关节、踝关节接触力曲线 (实线为左腿, 虚线为右腿)

Fig. 14 Joint reaction forces at left and right legs at hip, knee, ankle (continuous line is for left foot and dot line is for right foot)

图 13 所示为左右腿髋关节、膝关节、踝关节角速度曲线, 各关节角速度不超过 60 deg/s , 速度最大点对应的为图 1 中所示的脚踏车运动的上下死点阶段. 图 14 所示为左右腿髋关节、膝关节、踝关节接触力曲线, 三关节的最大接触力大小分别为: 54 N , 43 N , 85 N , 其中, 髋关节的接触力大小可为外骨骼电机的选择提供参考依据. 综上所述, 该仿真过程验证了外骨骼系统的有效性.

4 实验验证

为验证本设计的正确性, 通过开发原理样机进行实验, 康复机器人原理样机如图 15 所示. 本论文实验分为两部分, 实验 1 通过正常人脚踏轮椅并记录相关参数并进行相关分析, 通过实验结果曲线对比确定康复电机的控制策略; 实验 2 进行外骨骼与轮椅的主从式控制方法的验证.

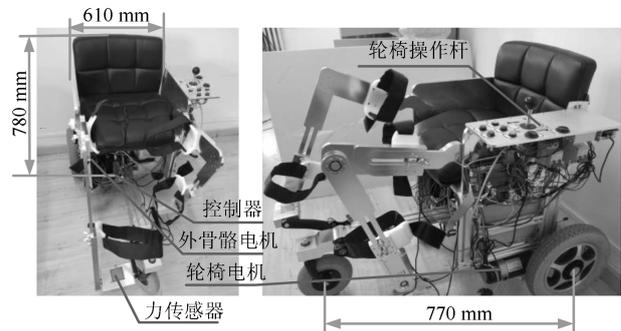


图 15 康复机器人原理样机

Fig. 15 A prototype of the rehabilitation robot

4.1 外骨骼运动特征分析实验

通过仿真分析了外骨骼运动的可行性, 为研究固定在踏板上的力传感器输出特性与外骨骼运动、轮椅运动的匹配关系, 本次完成了外骨骼运动特征分析实验. 首先邀请一个健康的志愿者 (体重约

60 kg, 身高 170 cm, 年龄 30 岁). 志愿者坐上轮椅, 根据下肢长度调整外骨骼长度后, 系上绑带将大小腿与外骨骼固定; 然后, 根据志愿者坐上轮椅后的状态校准脚底力传感器, 判定运动模式为主动模式 (健康志愿者、力量足够); 判定完成后, 开始康复与代步运动实验. 实验过程序列图如图 16 所示, 该序列为一个周期中志愿者脚蹬轮椅康复运动的动作过程. 在此过程中脚底力传感器受力情况及外骨骼电机位置值如图 17 所示.



图 16 实验过程中一周期内康复运动序列图及实验场景照片

Fig. 16 Experimental scene photos with one cycle rehabilitation movement sequence diagram in the experimental process

传感器是粘贴在踏板上的, 图 17 可以看出, 左右腿对称轴是 13 N 左右, 因此可知其预受力是 13 N 左右. 由于脚蹬车运动的特点, 曲线均成周期性变化且极限位置是确定的, 表明了结果的正确性, 同时可为不同的康复运动策略提供理论基础. 针对图 17(b) 和图 17(c), 与图 17(a) 中各阶段的受力周期相比, 图 17(b) 比图 17(c) 中的曲线更平滑、运动特征更鲜明, 并且位置信号比速度信号更容易得到, 因此本机器人宜采用位置控制的康复策略控制方法.

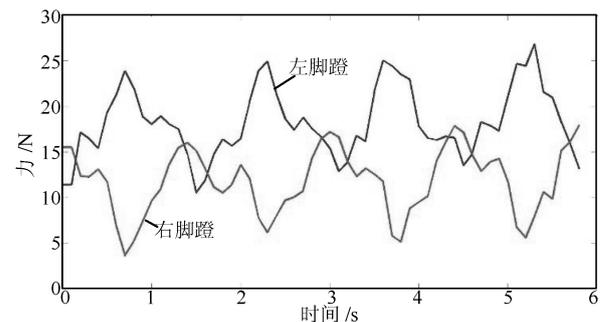
4.2 主从式操作方法验证实验

本文提出的主从式操作方法中, 主动运动为人的脚蹬车运动, 从动运动为外骨骼与轮椅的运动. 本次实验验证轮椅的运动对外骨骼运动的跟随性. 在上述实验基础上, 志愿者按自身意愿脚蹬踏板, 记录外骨骼运动速度与轮椅前进速度. 实验结果如图 18 所示, 图中所示的外骨骼运动速度与轮椅运动速度具有较好的跟随性. 可在此主动模式的基础上完成被动模式、主被动融合模式的康复训练策略.

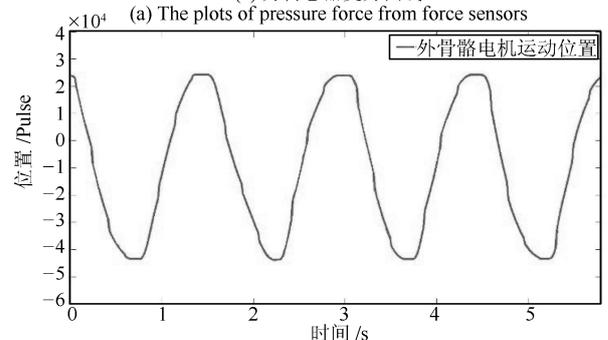
5 总结与展望

简单实用型康复机器人的研发对老人及下肢障碍者有重要意义. 本文运用脚蹬车运动的特点, 设计兼具康复锻炼与代步功能的外骨骼型机器人并提出主从式操作方法. 首先, 运用曲柄摇杆机构设计机

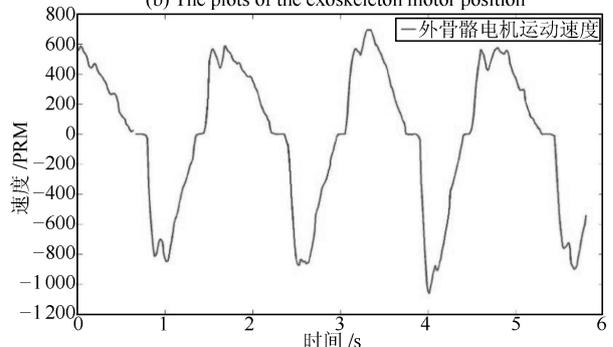
构方案, 建立下肢康复机器人三维模型; 为提高使用者参与感, 设计主从式控制器, 并运用主从式控制方法对机器人进行控制; 通过仿真, 初步验证了外骨骼系统的正确性; 最后, 通过实验, 确定主从式控制中不同康复模式的初始输入条件与康复运动控制方法, 并验证了从式运动对主式运动的跟随性. 本文只对外骨骼系统进行了初步仿真验证, 对于主从式操作方法及其介绍的控制流程还需要进一步的实验; 同时, 对相关传感器的灵敏度及各传感器配合情况仍需要进一步的实验验证, 后续实验可加上绑缚处人机交互作用力作为踏板处交互力的补充, 使控制过程更精准; 最后, 针对使用者如何方便地坐上轮椅, 以及如何最大限度地提高该机器人的康复效果, 仍需要进一步的设计与实验.



(a) 力传感器受力曲线



(b) 外骨骼电机位置曲线



(c) 外骨骼电机速度曲线

(c) The plots of the exoskeleton motor velocity

图 17 外骨骼运动特征分析实验

Fig. 17 The experiment for characteristics analysis of the exoskeleton motion

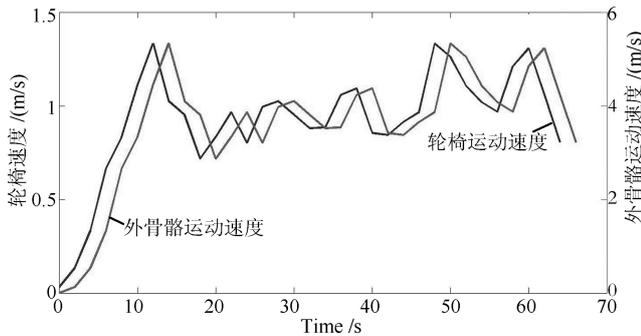


图 18 主从式运动速度曲线

Fig. 18 The plots of master-slave motion

References

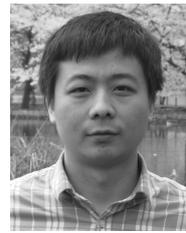
- Wu Yu-Shao, Dang Jun-Wu. *Blue Book for Aging: China Report of the Development on Silver Industry (2014)*. Beijing: Social Sciences Academic Press, 2014. 70–88
(吴玉韶, 党俊武. 老龄蓝皮书: 中国老龄产业发展报告 (2014). 北京: 社会科学文献出版社, 2014. 70–88)
- Wang Long-De. *Report on the Chinese Stroke Prevention (2015)*. Beijing: China Union Medical University Press, 2015. 10–22
(王陇德. 中国脑卒中防治报告 (2015). 北京: 中国协和医科大学出版社, 2015. 10–22)
- Tan Min, Wang Shuo. Research progress on robotics. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(7): 963–972
(谭民, 王硕. 机器人技术研究进展. 自动化学报, 2013, **39**(7): 963–972)
- Zhou Yuan, Wang Ning-Hua. Rehabilitation robot: review. *Chinese Journal of Rehabilitation Medicine*, 2015, **30**(4): 400–403
(周媛, 王宁华. 康复机器人概述. 中国康复医学杂志, 2015, **30**(4): 400–403)
- Volpe B T, Krebs H I, Hogan N, Edelstein O T R L, Diels C, Aisen M. A novel approach to stroke rehabilitation: robot-aided sensorimotor stimulation. *Neurology*, 2000, **54**(10): 1938–1944
- Ju M S, Lin C C K, Lin D H, Hwang I S, Chen S M. A rehabilitation robot with force-position hybrid fuzzy controller: hybrid fuzzy control of rehabilitation robot. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 2005, **13**(3): 349–358
- Hu Jin, Hou Zeng-Guang, Chen Yi-Xiong, Zhang Feng, Wang Wei-Qun. Lower limb rehabilitation robots and interactive control methods. *Acta Automatica Sinica*, 2014, **40**(11): 2377–2390
(胡进, 侯增广, 陈翼雄, 张峰, 王卫群. 下肢康复机器人及其交互控制方法. 自动化学报, 2014, **40**(11): 2377–2390)
- Ueda Y, Misu S, Sawa R, Nakatsu N, Sugimoto T, Sugiyama K, Takamori K, Ono K, Seki K, Handa Y, Ono R. Cycling wheelchair provides enjoyable pedaling exercises with increased physiological indexes. *Tohoku Journal of Experimental Medicine*, 2016, **238**(1): 33–38
- Restorative Therapies. RT300 leg [Online], available: <http://www.restorative-therapies.com/rt300leg>, July 24, 2014
- RECK-Technical GmbH & Co KG. MOTOMed [Online], available: <http://www.motomed.com/en/models.html>, July 24, 2014
- Best K L, Routhier F, Miller W C. A description of manual wheelchair skills training: current practices in Canadian rehabilitation centers. *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology*, 2015, **10**(5): 393–400
- Toro M L, Garcia Y, Ojeda A M, Dausey D J, Pearlman J. Quantitative exploratory evaluation of the frequency, causes and consequences of rehabilitation wheelchair breakdowns delivered at a paediatric clinic in Mexico. *Disability, CBR & Inclusive Development*, 2012, **23**(3): 48–64
- Jin Wen-Yu. Design and simulation analysis of rehabilitation wheelchair based on UG. *Machinery*, 2013, **40**(12): 67–69
(金文宇. 基于 UG 的康复轮椅设计与仿真分析. 机械, 2013, **40**(12): 67–69)
- Kim K, Payne K, Oh S, Hori Y. One-handed propulsion control of power-assisted wheelchair with advanced turning mode. In: Proceedings of the 13th International Workshop on Advanced Motion Control (AMC). Yokohama, Japan: IEEE, 2014. 633–638
- Watanabe T, Murakami T, Handa Y. Preliminary tests of a prototype FES control system for cycling wheelchair rehabilitation. In: Proceedings of the 2013 International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR). Seattle, WA, USA: IEEE, 2013. 1–6
- Watanabe T, Karasawa Y, Handa Y. A test of controlling different muscles in FES cycling with cycling wheelchair “Profhand”. In: Proceedings of the 19th International Functional Electrical Stimulation Society Annual Conference (IFESS). Kuala Lumpur, Malaysia: IEEE, 2014: 1–4
- Karasawa Y, Watanabe T, Handa Y. A basic study on analyzing acceleration of crank rotation for evaluation of FES cycling with cycling wheelchair. *Transactions of Japanese Society for Medical and Biological Engineering*, 2014, **52**(S): O-27–O-28
- Esquenazi A, Talaty M, Packel A, Saulino M. The ReWalk powered exoskeleton to restore ambulatory function to individuals with thoracic-level motor-complete spinal cord injury. *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*, 2012, **91**(11): 911–921
- Zeilig G, Weingarden H, Zwecker M. Safety and tolerance of the ReWalk exoskeleton suit for ambulation by people with complete spinal cord injury: a pilot study. *The Journal of Spinal Cord Medicine*, 2012, **35**(2): 96–101
- Talaty M, Esquenazi A, Briceno J E. Differentiating ability in users of the ReWalk powered exoskeleton: an analysis of walking kinematics. In: Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR). Seattle, WA, USA: IEEE, 2013. 1–5

- 21 Ueba T, Hamada O, Ogata T, Inoue T, Shiota E, Sankai Y. Feasibility and safety of acute phase rehabilitation after stroke using the hybrid assistive limb robot suit. *Neurologia Medico-Chirurgica*, 2013, **53**(5): 287–290
- 22 Nilsson A, Vreede K S, Häglund V, Kawamoto H, Sankai Y, Borg J. Gait training early after stroke with a new exoskeleton-the hybrid assistive limb: a study of safety and feasibility. *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, 2014, **11**(1): 1–11
- 23 Tong Li-Na, Hou Zeng-Guang, Peng Liang, Wang Wei-Qun, Chen Yi-Xiong, Tan Min. Multi-channel sEMG time series analysis based human motion recognition method. *Acta Automatica Sinica*, 2014, **40**(5): 810–821
(佟丽娜, 侯增广, 彭亮, 王卫群, 陈翼雄, 谭民. 基于多路 sEMG 时序分析的人体运动模式识别方法. 自动化学报, 2014, **40**(5): 810–821)
- 24 Peng Liang, Hou Zeng-Guang, Wang Wei-Qun. Synchronous active interaction control and its implementation for a rehabilitation robot. *Acta Automatica Sinica*, 2015, **41**(11): 1837–1846
(彭亮, 侯增广, 王卫群. 康复机器人的同步主动交互控制与实现. 自动化学报, 2015, **41**(11): 1837–1846)
- 25 Wang H B, Shi X H, Liu H T, Li L, Hou Z G, Yu H N. Design, kinematics, simulation, and experiment for a lower-limb rehabilitation robot. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 2011, **225**(6): 860–872
- 26 Yang C J, Niu B, Chen Y. Adaptive neuro-fuzzy control based development of a wearable exoskeleton leg for human walking power augmentation. In: Proceedings of the 2005 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Monterey, CA, USA: IEEE, 2005. 467–472
- 27 Jiang Hong-Yuan, Ma Chang-Bo, Lu Nian-Li, Ao Hong-Rui. Modeling and simulation on FES cycling training system. *Journal of System Simulation*, 2010, **22**(10): 2459–2463
(姜洪源, 马长波, 陆念力, 敖宏瑞. 功能性电刺激脚踏车训练系统建模及仿真分析. 系统仿真学报, 2010, **22**(10): 2459–2463)
- 28 Bian Hui, Zhao Tie-Shi, Tian Xing-Bin, Li Dan, Pan Wang. Rehabilitation facility with biological integration and application. *Robot*, 2010, **32**(4): 470–477
(边辉, 赵铁石, 田行斌, 李丹, 潘旺. 生物融合式康复机构及其应用. 机器人, 2010, **32**(4): 470–477)
- 29 Huang G, Ceccarelli M, Zhang W M, Liu H X, Tian Y, She H T, Fukuda T, Huang Q. A pedal-actuated wheelchair with a leg exoskeleton. In: Proceedings of the 14th IFToMM World Congress. Taipei, China: IFToMM, 2015.
- 30 So R C H, Ng J K F, Ng G Y F. Muscle recruitment pattern in cycling: a review. *Physical Therapy in Sport*, 2005, **6**(2): 89–96
- 31 Feland J B, Myrer J W, Schulthies S S, Fellingham G W, Measom G W. The effect of duration of stretching of

the hamstring muscle group for increasing range of motion in people aged 65 years or older. *Physical Therapy*, 2001, **81**(5): 1110–1117

- 32 Ziegler R G, Hoover R N, Nomura A M Y, West D W, Wu A H, Pike M C, Lake A J, Horn-Ross P L, Kolonel L N, Siiteri P K, Fraumeni J F Jr. Relative weight, weight change, height, and breast cancer risk in Asian-American women. *Journal of the National Cancer Institute*, 1996, **88**(10): 650–660

- 33 Hawkins D, Hull M L. A method for determining lower extremity muscle-tendon lengths during flexion/extension movements. *Journal of Biomechanics*, 1990, **23**(5): 487–494



黄高 北京理工大学机电学院智能机器人研究所博士研究生. 2010 年获得武汉轻工大学机械学院学士学位. 主要研究方向为康复机器人系统设计技术.

E-mail: huanggao@bit.edu.cn

(**HUANG Gao** Ph.D. candidate at the Intelligent Robotics Institute, School of Mechatronics Engineering,

Beijing Institute of Technology, China. He received his bachelor degree from Wuhan Polytechnic University in 2010. His main research interest is rehabilitation robot system design technology.)



张伟民 北京理工大学机电学院智能机器人研究所副教授. 1999 年获得北京理工大学学士学位, 2002 年和 2005 年分别获得北京理工大学机电学院硕士学位和博士学位. 主要研究方向为仿生机器人. 本文通信作者.

E-mail: zhwm@bit.edu.cn

(**ZHANG Wei-Min** Associate professor at the Intelligent Robotics Institute, School of Mechatronics Engineering, Beijing Institute of Technology, China. He received his bachelor, master and Ph.D. degrees from the School of Mechatronics Engineering, Beijing Institute of Technology, China in 1999, 2002 and 2005, respectively. His research interest covers bio-robots. Corresponding author of this paper.)



Marco Ceccarelli 意大利卡西诺大学教授. 1982 年获得罗马大学机械工程专业学士学位, 1987 年获得罗马大学博士学位. 主要研究方向为机器人机构设计与机械原理及机械工程历史.

E-mail: ceccarelli@unicas.it

(**MARCO Ceccarelli** Professor at University of Cassino and South Latium Via Di Biasio, Italy. He received mechanical engineering degree from the University La Sapienza of Rome, Italy, in 1982. He received his Ph.D. from the University La Sapienza of Rome, Italy in 1987. His research interest covers mechanism design, mechanics and design of robots, and history of mechanical engineering.)



余张国 北京理工大学机电学院智能机器人研究所副教授. 1997 年和 2005 年获得西南科技大学学士和硕士学位, 2009 年获得北京理工大学博士学位. 主要研究方向为仿生机器人.

E-mail: yuzg@bit.edu.cn

(**YU Zhang-Guo** Associate professor at the Intelligent Robotics Institute,

Beijing Institute of Technology, China. He received his bachelor and master degrees from Southwest University of Science and Technology, China in 1997 and 2005, respectively. He received his Ph. D. degree from Beijing Institute of Technology, China in 2009. His research interest covers bio-robots.)



陈学超 北京理工大学机电学院讲师. 2007 年和 2013 年分别获得北京理工大学机械电子工程专业学士学位和博士学位. 主要研究方向为仿生机器人和机器人动力学.

E-mail: chenxuechao@bit.edu.cn

(**CHEN Xue-Chao** Lecturer at the School of Mechatronics Engineering, Beijing Institute of Technology, China. He received his bachelor and Ph. D. degrees in mechatronics engineering from the Beijing Institute of Technology, China in 2007 and 2013, respectively. His research interest covers humanoid robotics and robot dynamics.)



孟非 北京理工大学机电学院博士后. 2008 年和 2010 年分别获得北京理工大学机械电子工程专业学士和硕士学位, 2016 年获得北京理工大学机械工程专业博士学位. 主要研究方向为电机驱动控制, 仿人机器人运动规划.

E-mail: mfly0208@bit.edu.cn

(**MENG Fei** Postdoctor at the Intelligent Robotics Institute, Beijing Institute of Technology, China. He received his bachelor, master, and Ph. D. degrees from Beijing Institute of Technology, China in 2008, 2010 and 2016, respectively. His research interest covers motor control and planning for biped robots.)



黄强 北京理工大学机电学院智能机器人研究所教授. 1989 年获得哈尔滨工业大学硕士学位, 1996 年获日本早稻田大学博士学位. 主要研究方向为仿人与仿生机器人, 康复机器人.

E-mail: qhuang@bit.edu.cn

(**HUANG Qiang** Professor at the Intelligent Robotics Institute, Beijing Institute of Technology, China. He received his master degree from Harbin Institute of Technology, China in 1989 and Ph. D. degree from Waseda University in 1996. His research interest covers humanoid robot, bio-robots, and rehabilitation robot.)