

编者按 在国家加快实施创新驱动发展战略的大背景下,“医工融合”“医工转化”已经成为医疗行业的研究热点。康复机器人是医工融合的一个重要分支,其研究主要集中在康复机械手、智能轮椅、假肢和康复治疗机器人等几个方面,涉及康复医学、机器人学、人工智能、生物力学、机械学、材料学、计算机科学等诸多学科。目前,康复机器人已被广泛应用于康复治疗、假肢和康复护理等领域,它可以代替治疗师为患者做长时间的、简单的重复运动,且能够保持相同的速度和力量,从而确保康复训练的舒适性和稳定性。

康复机器人主要适用于脑卒中、脑外伤、脑瘫等引起的肢体瘫痪以及肌腱或韧带断裂、脊髓损伤等运动创伤的早期康复训练等。它作为一种新兴的康复辅助技术,不仅可以帮助康复患者进行更好的康复训练和治疗,还极大地提高了康复的效率和精度,从而使患者获得更好的康复效果。未来的康复机器人将会朝着更加智能化、可穿戴化和远程化方向发展,助力康复治疗 and 医疗服务水平的不断提升。本刊一直关注医工融合在康复治疗领域的新技术、新发展,本期从相关医疗机器人的研发设计、构型特点、技术要点、分类和功能原理等方面入手,策划了“医工融合与康复机器人专栏”,以期各位专家、同仁共同探讨和促进医工融合与康复机器人的发展提供一个交流平台。

六自由度上肢康复机器人机构设计及轨迹规划

张邦成, 兰旭腾, 刘帅, 庞在祥

(长春工业大学机电工程学院 吉林 长春 130012)

摘要 本研究设计一款六自由度上肢康复机器人,机器人采用绳索驱动、串并联相结合的关节结构形式,能够牵引偏瘫患者的上肢实现多个关节且活动范围较大的康复运动训练。针对上肢康复机器人机构适用性问题,基于运动学理论和 D-H 坐标系法建立上肢康复机器人本体 D-H 参数模型,根据空间坐标向量之间的平移、旋转关系,对运动序列建模分析,求解正运动学,通过封闭解法求解逆运动学。基于运动学分析结果,提出五次多项式函数关节空间轨迹规划方法,对上肢提拉抬肘运动进行轨迹规划仿真,验证了康复运动过程中的运动能力。

关键词 上肢康复机器人; 运动学分析; 轨迹规划

中图分类号 R615 R496 **文献标识码** A **文章编号** 2096-7721 (2024) 02-0115-06

收稿日期: 2022-03-11 录用日期: 2023-04-28

Received Date: 2022-03-11 Accepted Date: 2023-04-28

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (51875047)

Foundation Item: National Natural Science Foundation of China(51875047)

通讯作者: 庞在祥, Email: pangzaixiang@ccut.edu.cn

Corresponding Author: PANG Zaixiang, Email: pangzaixiang@ccut.edu.cn

引用格式: 张邦成, 兰旭腾, 刘帅, 等. 六自由度上肢康复机器人机构设计及轨迹规划 [J]. 机器人外科学杂志 (中英文), 2024, 5(2): 115-120.

Citation: ZHANG B C, LAN X T, LIU S, et al. Mechanism design and trajectory planning of a 6-DOF upper limb rehabilitation robot [J]. Chinese Journal of Robotic Surgery, 2024, 5(2): 115-120.

Mechanism design and trajectory planning of a 6-DOF upper limb rehabilitation robot

ZHANG Bangcheng, LAN Xuteng, LIU Shuai, PANG Zaixiang

(School of Mechatronical Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China)

Abstract A six-degree-of-freedom upper limb rehabilitation robot was designed in this study. The rope-driven robot was taken series-parallel circuit, which could pull the upper limbs of hemiplegic patients to achieve rehabilitation exercise training with multiple joints and a large range of motion. Aiming at the applicability of the upper limb rehabilitation robot mechanism, based on the kinematics theory, the Denavit-Hartenberg (DH) parameter model of the upper limb rehabilitation robot body was designed based on the DH coordinates. Then the motion sequence was modeled and analyzed to solve the forward kinematics by analyzing the relationship of translation and rotation between the space coordinate vectors, and the inverse kinematics was solved with the closed-form solution. Based on the results of kinematics analysis, a quintic polynomial function on joint space trajectory planning was proposed to simulate the trajectory planning of the upper limb lifting and elbow lifting, which could be used to verify the movement ability during the rehabilitation exercise.

Key words Upper Limb Rehabilitation Robot; Kinematic Analysis; Trajectory Planning

脑卒中是指由急性脑血管循环障碍所导致的持续性大脑神经功能缺损、坏死, 85% 的脑卒中幸存者会留下不同程度的身体功能障碍^[1]。可穿戴式上肢外骨骼康复机器人是基于仿生学理论, 结合医工交叉学科进行设计, 服务于人体上肢运动功能康复训练的系统^[2]。可穿戴式上肢外骨骼康复机器人能够有效改善人体受伤组织, 促进神经系统的恢复, 使患者在日常生活中的运动功能不受影响^[3]。目前外骨骼式康复机器人结构设计方法是康复机器人研究的热点问题之一。

众多学者对上肢康复机器人展开了研究, 瑞士苏黎世联邦理工学院研制了外骨骼式上肢康复机器人 ARMin^[4], 瑞士 Hocoma 公司研制了外骨骼式上肢康复机器人 T-WREX^[5]。美国芝加哥大学研制了上肢康复训练机器人 ARM Guide, 该系统能够帮助患者完成直线往复式上肢康复训练任务^[6]。一些学者对柔性驱动的机器人进行研究, 如美国 Perry J C 等人研制了外骨骼式上肢康复机器人 ADEN-7, 该机器人系统具有 7 个自由度^[7]。Mao Y 等人^[8-9]研发出轻型绳索驱动外骨骼康复训练机器人 CAREX, 这是第 1 个将多级电缆驱动并联机构用于外骨骼机器人设计

中的机器人系统。瑞士研制生产了绳驱动外骨骼式康复机器人 Armeo Power, 该机器人系统的关节之间均采用绳索进行驱动^[10]。英国索尔福德大学研制开发了 7 自由度气动肌肉驱动的上肢康复机器人^[11]。美国亚利桑那州立大学研制了 RUPERT 多自由度上肢康复机器人, 适用于 95% 以上的偏瘫患者。美国华盛顿大学研制了气动上肢康复机器人 BONES, 该机器人主要用于肘关节以及腕关节的康复训练^[12-14]。

本研究针对现有机器人在康复过程中机器人结构与人体上肢不匹配的问题, 设计了绳索驱动串并联相结合的 6 自由度可穿戴式上肢外骨骼康复机器人, 并对该系统进行运动分析和轨迹规划研究, 验证了其能够满足上肢康复训练要求。

1 上肢外骨骼康复机器人整体结构

对于脑卒中引起的偏瘫患者来说, 通过康复机器人来实现人体上肢功能康复运动的方式有多种。但上肢康复机器人的设计在考虑实现方式的同时, 还应考虑机构是否具有良好的人机交互能力, 以及康复装置与患者受损的肢体结构、运动形式的契合性等问题。本研究综合

考虑了偏瘫患者使用的安全性、对患肢的支撑性和大工作空间等因素，所设计的上肢康复机器人采用外骨骼式串并联相结合的关节结构形式，该结构能够与人体紧密配合，牵引肢体共同完成协调运动。

为满足偏瘫患者的康复需要，本研究设计并开发的上肢康复机器人主要针对脑卒中患者的中期半主动康复训练和后期主动康复训练，结合人体上肢肌肉解剖学特性和相关参数，从上肢各骨骼和关节的运动特点出发，确定人手臂各关节的运动角度范围，提出了一种以绳索传动为主，“绳索+齿形带”的广义绳索驱动机构设计方法。该机构采用绳索驱动和串并联相结合的关节结构形式，机器人能够牵引偏瘫患者的上肢实现多个关节进行活动范围较大的康复运动训练。通过上肢康复机器人对偏瘫患肢进行运动康复来维持患肢的关节活动度、防止患肢肌肉萎缩、增强患肢肌力、促进患肢功能的恢复，为脑卒中造成的上肢偏瘫患者提供一种有效的康复器材。

肩关节康复运动的康复机构取决于人体肩关节运动和不同人员的体型特征。肩关节康复运动的外骨骼康复机构固定在可升降式平台，由3个主运动模块和1个被动调节模块组成。3个主运动模块分别用来实现肩关节的屈/伸、旋内/旋外、外展/内收运动，被动调节模块可实现关节局部调节功能。肩关节的屈/伸、外展/内收两个自由度均采用电机+减速器的传动形式进行装置之间的驱动和连接。由于以大臂为轴进行旋内/旋外时，需要将机器人与人体进行穿戴，不能采用电机进行直接驱动，所以本研究通过圆弧滑轨来实现肩关节的旋内/旋外运动。

肘关节运动机构采用双向缠线盘结构，通过一个电机实现双向的精准驱动，避免了双电机绕线机构同步性差的问题。肘关节运动机构的驱动部分安装在基座上，电机的双向驱动盘通过绳索将动力传递给肘部双向缠线盘，从而

完成肘部的屈/伸运动。肘关节运动机构的驱动部分安装在基座上，电机的双向驱动盘通过绳索将动力传递给肘部双向缠线盘，从而完成肘部的屈/伸运动。考虑到肘部需承受较大扭矩，所以应用两个交叉滚子轴承以增加肘部结构的承载能力和减小旋转轴的径向误差。硅胶护垫的应用符合人体手臂运动时肘部的运动要求，增加了穿戴舒适性与装置美观性。

腕部前后部分通过一个圆锥压缩弹簧完成连接，圆锥压缩弹簧用来模拟人的腕部活动关节，其周围设有三组绳索机构，每组绳索机构相隔120°，用以模拟手腕肌肉，完成对腕部的驱动控制。每个绳索机构均在基座配有一个动力源。

该机器人各关节机构与人体上肢大臂、前臂、手腕部分紧密结合，利用机器人铰链式旋转副、弧形齿条、塔簧等的自由度实现了对上肢多个关节的康复训练。机器人在矢状面上能实现肩关节的屈/伸0°~100°、外展/内收0°~120°、旋内/旋外0°~110°；肘关节的屈/伸0°~105°、旋内/旋外0°~90°；腕关节的屈/伸0°~90°。关节运动分析角度范围满足上肢康复训练过程角度要求。上肢康复机器人结构图如图1所示。

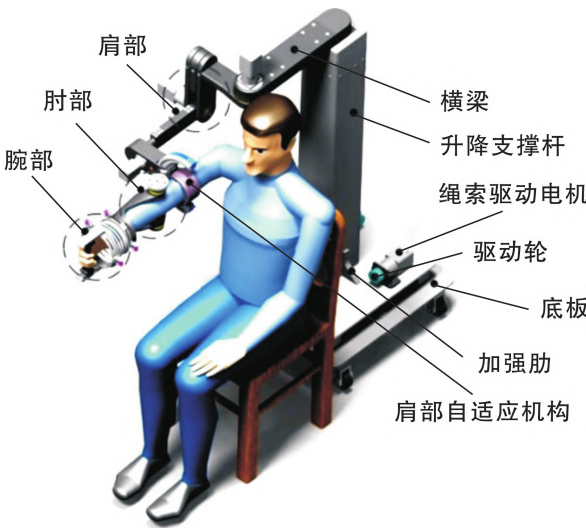


图1 上肢康复机器人结构图

Figure 1 Structure of upper limb rehabilitation robot

2 康复机器人关节空间轨迹规划

上肢康复机器人在康复训练过程中,需对所进行的康复训练任务设定相应的康复运动轨迹。为更好地完成特定的康复任务,需对所设计的康复机器人运动轨迹进行规划。上肢康复机器人需要在保证安全和康复效果的同时,规划出符合人体上肢运动规律和康复医学规律的机器人轨迹。

为了方便对偏瘫患者的上肢各关节进行特定角度范围的康复训练,减少计算量,确保康复机器人位置准确和运行平稳,本研究选用五次多项式对上肢康复机器人进行关节空间轨迹规划,保证所规划的轨迹速度平滑、加速度连续。

在关节空间中,假设康复机器人某关节在约束起始时间 t_0 时刻和终止时间 t_n 时刻所对应的关节角分别为 θ_0 和 θ_n ,则可用平滑的五次多项式插值函数 θ_t 来描述起止点之间的运动轨迹,即:

$$\theta(t) = m_0 + m_1 t + m_2 t^2 + m_3 t^3 + m_4 t^4 + m_5 t^5 \quad (2.1)$$

关节处的速度公式为(2.1)的一阶导数,表示为:

$$\dot{\theta}(t) = m_1 + 2m_2 t + 3m_3 t^2 + 4m_4 t^3 + 5m_5 t^4 \quad (2.2)$$

关节处的加速度公式为(2.1)的二阶导数,表示为:

$$\ddot{\theta}(t) = 2m_2 + 6m_3 t + 12m_4 t^2 + 20m_5 t^3 \quad (2.3)$$

其中, $\dot{\theta}(t_0) = a_0$, $\dot{\theta}(t_n) = a_n$ 将上述公式进行推导:

$$\begin{cases} \theta(t_0) = m_0 + m_1 t_0 + m_2 t_0^2 + m_3 t_0^3 + m_4 t_0^4 + m_5 t_0^5 = \theta_0 \\ \theta(t_n) = m_0 + m_1 t_n + m_2 t_n^2 + m_3 t_n^3 + m_4 t_n^4 + m_5 t_n^5 = \theta_n \\ \dot{\theta}(t_0) = m_1 + 2m_2 t_0 + 3m_3 t_0^2 + 4m_4 t_0^3 + 5m_5 t_0^4 = \nu_0 \\ \dot{\theta}(t_n) = m_1 + 2m_2 t_n + 3m_3 t_n^2 + 4m_4 t_n^3 + 5m_5 t_n^4 = \nu_n \\ \ddot{\theta}(t_0) = 2m_2 + 6m_3 t_0 + 12m_4 t_0^2 + 20m_5 t_0^3 = \theta_0'' \\ \ddot{\theta}(t_n) = 2m_2 + 6m_3 t_n + 12m_4 t_n^2 + 20m_5 t_n^3 = \theta_n'' \end{cases} \quad (2.4)$$

假设起始时间与终止时间均为 0,则可得出:

$$\begin{cases} m_0 = \theta_0 \\ m_1 = \nu_0 \\ m_2 = a^2/2 \\ m_3 = [20\theta_n - 20\theta_0 - (8\nu_n + 12\nu_0)t_n - (3a_0 - a_n)t_n^2]/2t_n^3 \\ m_4 = [30\theta_n - 30\theta_0 - (14\nu_n + 16\nu_0)t_n - (3a_0 + a_n)t_n^2]/2t_n^4 \\ m_5 = [12\theta_n - 12\theta_0 - (6\nu_n + 6\nu_0)t_n - (3a_0 - a_n)t_n^2]/2t_n^5 \end{cases} \quad (2.5)$$

关节空间中点到点的运动要求 $\dot{\theta}_0 = \dot{\theta}_n = 0$, $\ddot{\theta}_0 = \ddot{\theta}_n = 0$ 可求出式(2.5)中的各系数。并可推导得出关节角度位置、角速度和角加速度的函数式为:

$$\begin{cases} \theta_t = \frac{6(\theta_n - \theta_0)}{t_n^5} t^5 - \frac{15(\theta_n - \theta_0)}{t_n^4} t^4 + \frac{10(\theta_n - \theta_0)}{t_n^3} t^3 + \theta_0 \\ \dot{\theta}_t = \frac{30(\theta_n - \theta_0)}{t_n^5} t^4 - \frac{60(\theta_n - \theta_0)}{t_n^4} t^3 + \frac{30(\theta_n - \theta_0)}{t_n^3} t^2 \\ \ddot{\theta}_t = \frac{120(\theta_n - \theta_0)}{t_n^5} t^3 - \frac{180(\theta_n - \theta_0)}{t_n^4} t^2 + \frac{60(\theta_n - \theta_0)}{t_n^3} t \end{cases} \quad (2.6)$$

3 仿真实验分析

上肢康复机器人在康复训练过程中,需对所进行的康复训练任务设定相应的康复运动轨迹,为了能够更好地完成特定的康复运动任务,寻找最优的康复训练路径,需要对所设计的康复机器人运动轨迹进行规划。上肢康复机器人需要保证安全和康复效果的同时,规划出符合人体上肢运动规律和康复医学规律的机器人轨迹。为给定上肢康复机器人真实合理的训练轨迹(如图2),本研究采用 Qualisys 三维动作捕捉系统对人体上肢的运动轨迹进行采集,分别在人体的肩部、大臂和小臂粘贴4个标记点并将其定义为刚体,用以建立人体上肢的局部坐标系;分别在肩关节、肘关节、腕关节和手部粘贴1个标记点,用以提取运动轨迹(如图3)。受试者在20s内用右手连续摸腹部和背部3次,将三维动作捕捉系统采集到的各关节角度数据导出至 MATLAB 软件进行处理。

通过上肢康复机器人系统进行康复目的是维持偏瘫患者患肢的关节活动度、防止患肢肌肉萎缩、增强患肢肌力、促进患肢功能恢复。因此,本研究以日常上肢中的提拉抬肘动作为



图2 三维动作捕捉系统
Figure 2 3D motion capturing system

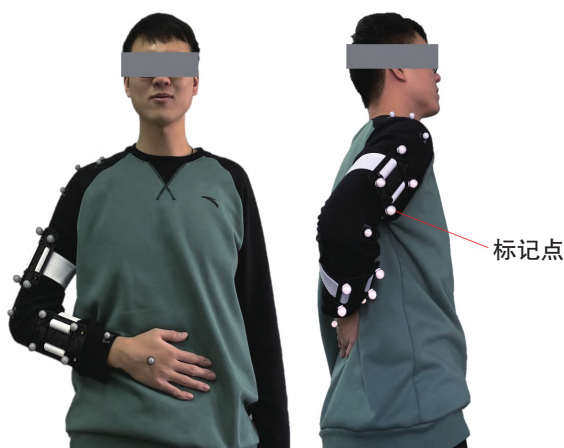


图3 康复训练动作
Figure 3 Rehabilitation training actions

例, 对所设计的机器人进行关节空间的轨迹规划。首先, 通过设定提拉抬肘时动作的起始位置, 关节角度设定为 $p_0 = [-90^\circ, 45^\circ, 0^\circ, -90^\circ]$, 完成动作时机器人末端所对应的关节角度设定为 $p_1 = [-90^\circ, 90^\circ, 0^\circ, -30^\circ]$, 利用所得到的五次多项式插值函数, 在 Matlab 软件中对提拉抬肘动作进行轨迹规划, 设置系统运行时间为 10 s, 采样时间为 0.1 s, 在动作过程中通过绘制曲线图得到各关节的角位移曲线 (如图 4)、各关节角速度曲线 (如图 5), 以及各关节角加速度曲线 (如图 6)。

图4为上肢康复机器人各关节角位移曲线, 该系统中关节 1 和关节 3 角度不发生变化, 关节 2 从 45° 运动到 90° , 关节 4 从 -90° 运动到 -30° ,

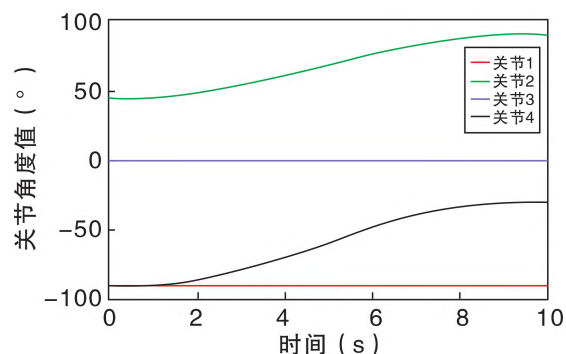


图4 各关节角位移曲线
Figure 4 Angular displacement curve of each joint

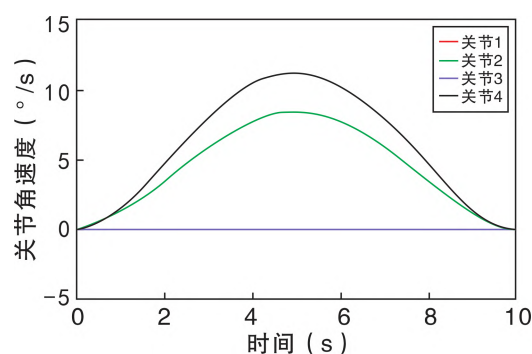


图5 各关节角速度曲线
Figure 5 Angular velocity curve of each joint

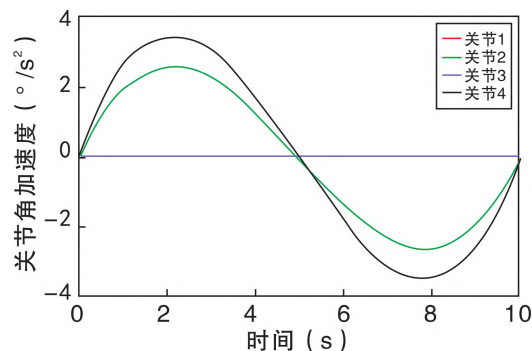


图6 各关节角加速度曲线
Figure 6 Angular acceleration curve of each joint

对应轨迹规划的始末位置关节角度值, 通过轨迹曲线可看出, 各关节运动较为平稳、光滑。

图5为上肢康复机器人各关节角速度曲线, 各关节的初始速度和终止速度均为 0, 角速度函数是连续的, 机器人在运动过程中平稳, 无刚性冲击。

图6为上肢康复机器人各关节角加速度曲线, 各关节的初始位置和终止位置加速度均为 0, 未发生柔性冲击。在提拉抬肘动作的轨迹规划

中, 机器人末端运行平稳, 速度与加速度连续, 无刚性和柔性冲击, 满足轨迹规划要求, 轨迹规划合理, 具有完成多个关节复合康复运动的能力。

4 结论

本研究针对现有机器人康复过程中机器人与人体上肢不匹配的问题, 设计了绳索驱动串并联相结合的 6 自由度可穿戴式上肢外骨骼康复机器人。基于运动学分析结果, 提出五次多项式函数关节空间轨迹规划方法, 并采用 MATLAB 软件对上肢抬肘的运动进行轨迹规划仿真, 验证了康复运动过程中运动能力及设计的合理性。接下来的研究将逐步引入 EMG 等生理信号传感器, 实现对穿戴者运动的预测控制及柔性外骨骼的主动运动控制模式。

利益冲突声明: 本文不存在任何利益冲突。

作者贡献声明: ①张邦成负责拟定写作思路, 指导撰写文章并最后定稿; ②兰旭腾负责设计论文框架, 起草论文; ③刘帅负责数据收集和分析, 绘制图表; ④庞在祥负责论文修改。

参考文献

- [1] Tarvonen-Schrder S, Niemi T, Hurme S, et al. Fall assessment in subacute inpatient stroke rehabilitation using clinical characteristics and the most preferred stroke severity and outcome measures[J]. *Eur J Physiother*, 2021. DOI: 10.1080/21679169.2021.1960600.
- [2] LI Y C, LIN K C, CHEN C L, et al. A comparative efficacy study of robotic priming of bilateral approach in stroke rehabilitation[J]. *Front Neurol*, 2021. DOI: 10.3389/fneur.2021.658567.
- [3] Lee S H, Cui J, Liu L, et al. An evidence-based intelligent method for upper-limb motor assessment via a VR training system on stroke rehabilitation[J]. *IEEE Access*, 2021. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3075778.
- [4] SUN Z B, TIAN Y T, LI H Y, et al. A superlinear convergence feasible sequential quadratic programming algorithm for bipedal dynamic walking robot via discrete

mechanics and optimal control[J]. *Optim Contr Appl Met*, 2016, 37(6): 1139–1161.

- [5] Guidali M, Duschau-Wicke A, Broggi S, et al. A robotic system to train activities of daily living in a virtual environment[J]. *Med Biol Eng Comput*, 2011, 49(10): 1213–1223.
- [6] SUN Z B, SHI T, WEI L, et al. Noise-suppressing zeroing neural network for online solving timevarying nonlinear optimization problem: a control-based approach[J]. *Neural Comput. Appl*, 2020, 32(2): 11505–11520.
- [7] Perry J C, Rosen J, Burns S. Upper-limb powered exoskeleton design[J]. *IEEE/ASME Trans. Mechatron*, 2007, 12(4): 408–417.
- [8] SUN Z B, LI F, ZHANG B C, et al. Different modified zeroing neural dynamics with inherent tolerance to noises for time-varying reciprocal problems: a control-theoretic approach[J]. *Neurocomputing*, 2019. DOI: 10.1016/j.neucom.2019.01.064.
- [9] Mao Y, Agrawal S K. Design of a cable-driven arm exoskeleton (CAREX) for neural rehabilitation[J]. *IEEE Trans Rob*, 2012, 28(4): 84–92.
- [10] Perry J C, Rosen J. Design of a 7 degree-of-freedom upper-limb powered exoskeleton[J]. *IEEE/RAS-EMBS International Conference on Biomedical Robotics & Biomechatronics*, 2006, 12(4): 408–417.
- [11] Kousidou S, Tsagarakis N G, Smith C, et al. Task-orientated biofeedback system for the rehabilitation of the upper limb[C]. *IEEE 10th International Conference on Rehabilitation Robotics*, IEEE Press, 2007: 376–384.
- [12] Sugar T G, He J H, Koeneman E J, et al. Design and control of Rupert: a device for robotic upper extremity repetitive therapy[J]. *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng*, 2007, 15(3): 336–346.
- [13] Balasubramanian S, Wei R H, Perez M, et al. RUPERT: an exoskeleton robot for assisting rehabilitation of arm functions[C]. *2008 Virtual Rehabilitation*, IEEE Press, 2008, (1): 163–167.
- [14] Klein S, Spencer S, Allington J, et al. Optimization of a parallel shoulder mechanism to achieve a high-force, low-mass, robotic-arm exoskeleton[J]. *IEEE Trans. Robot*, 2010, 26(4): 710–715.

编辑: 刘静凯