

· 康复工程 ·

三维空间末端牵引上肢康复机器人轨迹规划研究*

夏鹏鹏¹ 韩建海^{1,2,4} 李辽远¹ 李向攀^{1,2} 郭冰菁^{1,2} 杜敢琴³

摘要

目的:为了解决现有康复机器人结构复杂、柔顺性和安全性不足、作业治疗中三维空间训练欠缺等问题,提出三维空间末端牵引式上肢康复训练机器人。

方法:通过对上肢康复机器人的结构、运动学理论和人体上肢运动范围分析,建立人机交互的安全空间;结合康复医学中的作业疗法,进行康复动作设计及末端轨迹规划,运用Matlab对机器人末端运动轨迹进行仿真分析,并通过实验验证设计的合理性及可行性。

结果:通过仿真分析和实验结果可以看出机器人末端轨迹及各关节速度和加速度曲线平滑,无跳动现象。

结论:三维空间末端牵引式上肢康复机器人可以实现二维和三维空间的康复训练,用气压比例伺服控制实现末端直线位移,增加了康复训练的柔顺性和安全性,更好满足康复医学中作业疗法的要求。

关键词 三维空间;上肢康复机器人;运动学;安全空间;轨迹规划

中图分类号:R681.7,R496 **文献标识码:**B **文章编号:**1001-1242(2021)-11-1414-06

近年来,由于生活节奏加快、工作压力增大和人口老龄化等原因导致脑卒中患者越来越多,在脑卒中引起的偏瘫患者中,又以患有上肢功能障碍的人居多,严重影响患者日常生活^[1-2]。医学证明,脑卒中患者可以通过科学合理的康复训练恢复其肢体的基本功能,但上肢运动复杂,不仅包括大运动,还有很多精细运动,治疗过程仍是较难解决的问题^[3]。传统的治疗手段多依赖于康复治疗师的专业程度,效率较低,难以满足需求,因此康复机器人技术逐渐成为康复领域研究热点。上肢康复训练机器人辅助康复治疗师对偏瘫患者进行康复训练,能保证患者的动作精度和训练强度,缓解我国康复医师不足的压力^[4]。

上肢康复训练机器人根据结构不同,可分为末端牵引式和外骨骼式两大类^[5]。外骨骼式机器人虽在具体部位康复训练具有更好的效果,但结构复杂,穿戴不便。Lee SH等^[6]将末端牵引式和外骨骼康复机器人对慢性脑卒中患者上肢功能影响做对比,研究结果显示,末端牵引组要明显优于外骨骼机器人。末端牵引式康复机器人结构简单,在国内外都有很多研究成果,如麻省理工学院开发的MIT-Manus上肢康复机器人和清华大学开发的一种2-DOF上肢康复训练机器人系统,患者可以在机器人的牵引下依照预设的轨迹进行康复训练^[7-8],但这些机器人只能实现平面二维空间的康复训

练。除此之外,大部分末端牵引式上肢康复机器人还具有驱动电机距离执行装置较近、柔顺性较差等缺点。

为满足上肢三维空间训练及柔顺性的需求,依据康复医学中的人体关节运动学理论,从机构学角度设计柔顺、安全、轻便的三维空间末端牵引式上肢康复训练机器人。医、工的有机结合表现在以下两个方面:①对上肢康复机器人进行运动学理论分析,结合人体上肢结构和机器人末端工作空间,建立人机交互的安全工作空间。②基于康复医学中的作业疗法(occupational therapy,OT)规划康复动作及末端训练轨迹。

1 机器人本体结构设计

上肢康复训练机器人的本体主要由基座、大臂和小臂组成的电机驱动2R关节和由气缸驱动1P关节构成的3DOF空间结构,2R机械臂在水平面的旋转运动与手部在垂直面的上下移动叠加,可实现机器人末端在三维空间的运动,其三维模型如图1所示。机器人旋转关节驱动电机和减速器都安装在基座上,通过同步带传动,减轻了机械臂的重量;末端组件与小臂之间通过单作用气缸连接,增加了康复训练时的柔顺性和安全性;大臂和小臂关节处设计有机械限位槽,保证患者在康复训练时的安全性;底部设计有四个轮子,方便康复机器人的移动,制作的物理样机如图2所示。末端组件

DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2021.11.015

*基金项目:河南省科技攻关项目(212102310890);河南省科技攻关项目(192102210065)

1 河南科技大学机电工程学院,河南省洛阳市,471003; 2 河南省机器人与智能系统重点实验室; 3 河南科技大学第一附属医院神经内科; 4 通讯作者

第一作者简介:夏鹏鹏,男,硕士研究生; 收稿日期:2021-04-14

中手柄和臂托为人机接触点,机器人通过伺服电机驱动与比例伺服气缸驱动的协调控制,带动患者手臂在三维空间中完成不同的康复动作。机器人内藏三维力传感器,安装单作用气缸和小臂之间,为实现人机交互控制提供可能。采用灵思创奇公司的半实物仿真机(links-box)作为整机控制系统,方便机器人的实时控制、传感器数据采集与处理。

图1 机器人三维模型图

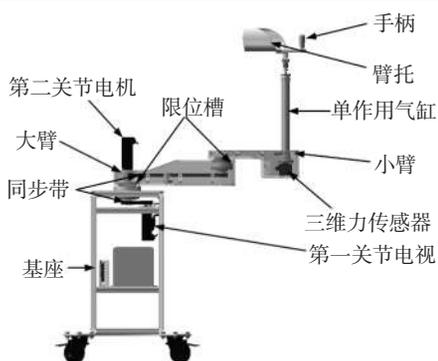


图2 机器人物理样机图

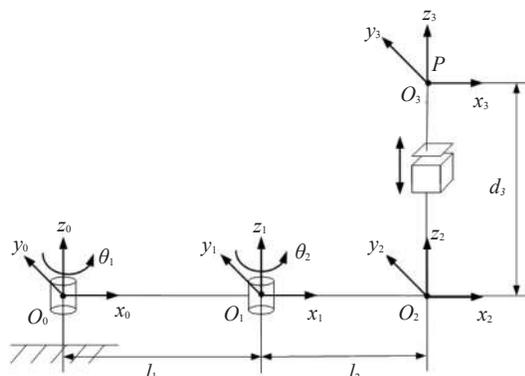


2 运动学建模分析

采用D-H参数法以基座与大臂的铰接点为原点建立上肢康复训练机器人的连杆坐标系,运动坐标系简图如图3所示。基座与大臂的铰接点为旋转关节 θ_1 ,大臂与小臂的铰接点为旋转关节 θ_2 ,单作用气缸与末端组件的连接点为移动关节 d_3 ,P点为机器人末端组件与人的人机接触点。

为保证上肢康复训练机器人满足大多数人的使用需求,各连杆的参数依据康复医学中的人体关节运动学理论,参照GB10000-1988中国成年人人体尺寸标准95%分位数据进行设计,取 $L_1=350\text{mm}$, $L_2=250\text{mm}$,为保证康复训练时的安全

图3 机器人连杆坐标系简化图



性,旋转关节变量 θ_1 和 θ_2 取值范围分别为 $-130^\circ-60^\circ$ 和 $10^\circ-150^\circ$,移动关节变量 d_3 受单作用气缸限制,取值为 $500-650\text{mm}$,D-H参数如表1所示。

表1 机器人D-H参数表

连杆	$\theta_i(^{\circ})$	$d_i(\text{mm})$	$a_i(\text{mm})$	$\alpha_i(^{\circ})$
1	θ_1	0	L_1	0
2	θ_2	0	L_2	0
3	0	d_3	0	0

运动学分析分为正运动学分析和逆运动学分析,研究机器人的末端位姿和关节角之间的关系。根据齐次坐标变换方程,可求得末端P点相对于基座标的位姿矩阵 0T_3 ,其中 $c\theta = \cos \theta$, $s\theta = \sin \theta$ 。

$${}^0T_3 = \begin{bmatrix} c(\theta_1 + \theta_2) & -s(\theta_1 + \theta_2) & 0 & L_1c\theta_1 + L_2c(\theta_1 + \theta_2) \\ s(\theta_1 + \theta_2) & c(\theta_1 + \theta_2) & 0 & L_1s\theta_1 + L_2s(\theta_1 + \theta_2) \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

根据位姿矩阵得到末端点 $P(x, y, z)$ 在空间中的坐标位置方程为:

$$\begin{cases} x = L_1c\theta_1 + L_2c(\theta_1 + \theta_2) \\ y = L_1s\theta_1 + L_2s(\theta_1 + \theta_2) \\ z = d_3 \end{cases} \quad (2)$$

机器人空间位置姿态:

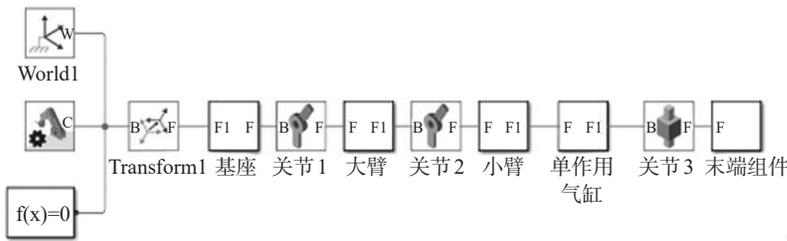
$$R = \begin{bmatrix} c(\theta_1 + \theta_2) & -s(\theta_1 + \theta_2) & 0 \\ s(\theta_1 + \theta_2) & c(\theta_1 + \theta_2) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

逆运动学求解得到旋转关节角度及移动关节位移方程为:

$$\begin{cases} \theta_1 = \arctan \frac{y}{x} - \arccos \frac{x^2 + y^2 + L_1^2 - L_2^2}{2L_1\sqrt{x^2 + y^2}} \\ \theta_2 = \arccos \frac{x^2 + y^2 - L_1^2 - L_2^2}{2L_1L_2} \\ d_3 = z \end{cases} \quad (4)$$

根据机器人的三维模型图和D-H参数分析,利用Simscape Multibody工具箱,使用代表身体、关节、约束、力元素、气动和传感器的模块来建立康复训练机器人机构模型^[9],如图4所示。将机器人各部分的质量、惯量、关节、约束如实输入机构模型中,确保康复训练机器人的机构模型更符合实物,使依据此机构模型仿真的数据更加准确。

图4 康复训练机器人机构模型图

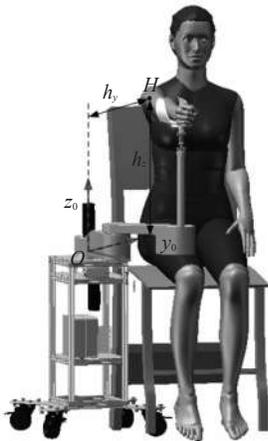


3 机器人安全工作空间分析

上肢康复机器人的安全工作空间指的是人体上肢的运动空间集合与机器人的末端所能达到的空间集合的交集,是康复动作规划的重要指导依据。以患者在良姿位下进行康复训练为基础,以避免患者在康复训练时受到二次伤害为目的,设计的上肢康复机器人与患者的相对位置如图5所示。即患者在康复训练时平行于机器人而坐,肩关节的旋转点H距机器人的基座坐标系原点 O_0 沿 z_0 轴方向距离为 $h_z=500\text{mm}$,沿 y_0 方向距离为 $h_y=200\text{mm}$,沿 x_0 方向距离为 0mm 。手掌握于机器人末端手柄,手臂放于臂托之上,可保护患者手腕,增加康复训练时的安全性。

机器人的末端所能达到的空间集合是指人机交互点P在空间中所能达到的位置,可根据机器人正运动学求解得出。人体上肢的运动空间集合比较复杂,根据解剖学分析,人体上

图5 机器人与患者的相对位置图



肢有7个自由度,包括肩关节的屈伸、内收外展和内外旋,肘关节屈伸,前臂旋前旋后,腕关节的掌屈背屈和尺偏桡偏^[10]。上肢三关节的相互配合,实现上肢复杂的运动功能。根据人体工程学标准,人体上肢建模参照GB10000-1988中国成年人人体尺寸标准95%分位设定:大臂长度为340mm,小臂长度为260mm。上肢康复训练机器人主要应用于偏瘫患者的肩

肘关节康复,根据康复医学中的人体关节运动学理论分析,偏瘫患者上肢实际运动范围要小于正常人体上肢活动范围,为防止患者在康复训练时受到二次伤害,着重对患者的肩肘关节运动范围及人机协调性进行分析,得到患者上肢肩肘关节的运动范围如表2所示。

利用Matlab对康复训练机器人和人体上肢进行建模,采用蒙特卡洛法(monte carlo method)对机器人的安全工作空间进行仿真分析^[11],可以获得康复机器人的工作空间和人体上肢的运动空间,如图6所示,两个空间的交集即为康复机器人的安全工作空间。

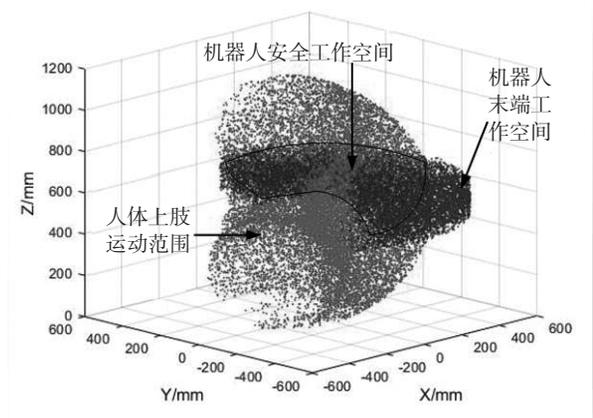
4 康复动作设计与轨迹规划仿真

依据康复医学中的作业疗法,应用一些患者日常生活中

表2 患者上肢肩肘关节的活动范围

关节及自由度	运动范围(°)
肩关节	
屈曲伸展	0—70 / -90—0
内旋外旋	-90—0 / 0—40
外展内收	-150—0 / 0—30
肘关节	
屈曲伸展	0—155 / 0—0
前臂	
旋前旋后	-90—0 / 0—70

图6 康复机器人的安全工作空间



常用的一些动作,有目的对患者进行作业训练,以提高患者的生活自理能力,使患者康复后能最大限度的适应日常生活环境^[12]。结合所设计的上肢康复机器人的结构,康复动作设计以肩关节的屈曲伸展和内收外展、肘关节屈曲伸展等单关节运动为基础,如图7所示,多关节复合运动实现平面或三维空间的康复动作。康复训练时首先保证肩肘关节的运动功能训练和恢复,其次依靠机器人末端设计的被动关节,使得腕关节可以在肩肘关节康复训练时得到一定程度的被动训练。

图7 单关节康复动作设计



4.1 2D轨迹规划及仿真分析

擦墙、擦桌子和画几何图形等二维空间的作业治疗动作是目前上肢康复机器人常用康复动作,以此设计的平面画圆、“1”字形和“8”字形等康复运动轨迹,可以在平面空间内对患者的单关节或多关节进行康复锻炼^[13]。在康复机器人的安全工作空间内,以康复训练时常用的平面画圆为例,规划训练轨迹圆心位于基座标系(300,200)处、半径为150mm的标准圆,轨迹函数曲线方程式如式(5)。

$$\begin{cases} x = 300 + 150 \cos(t) \\ y = 200 + 150 \sin(t) \\ z = 0 \end{cases} \quad (5)$$

利用S型曲线对机器人的末端画圆轨迹进行插值处理,运用Simscape Multibody搭建的康复训练机器人机构模型进行仿真验证,设定仿真时间为10s,得到康复机器人末端2D运动轨迹如图8所示。从图中可以看出康复机器人末端轨迹平滑,无跳动现象。画圆时主要是大臂和小臂处的旋转关节转动,其旋转关节曲线如图9所示,角位移、角速度和角加速度曲线转折处平滑、无突变现象。证明仿真过程中康复机器人运动平稳。

4.2 3D轨迹规划及仿真分析

人体上肢的运动大部分都在三维空间内,如饮食、整理餐具、击球和取书等,仅有平面空间的康复训练不能满足患者回归社会和家的需求。现根据三维空间末端牵引式康复训练机器人的结构,以及参考作业治疗中的击球和抛投等动作^[14],在机器人的安全工作空间内,设计了水平面画圆辅以垂直面平移组成的螺旋形、空间圆弧及空间画圆等康复训练轨迹。其中螺旋形康复运动轨迹函数方程式如式(6),可以将肩关节的屈曲伸展、外展内收和肘关节的屈曲伸展一起

图8 末端2D运动轨迹

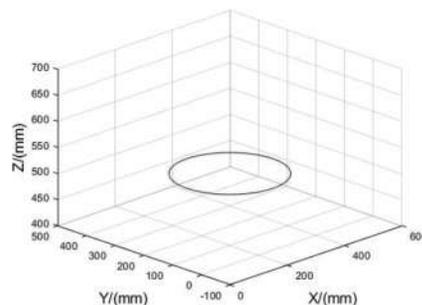
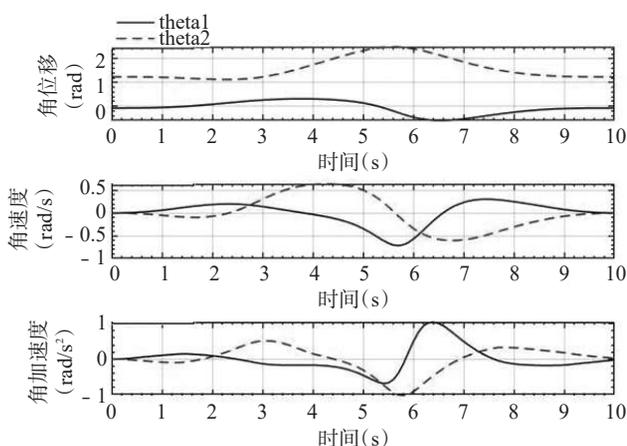


图9 圆轨迹旋转关节曲线图

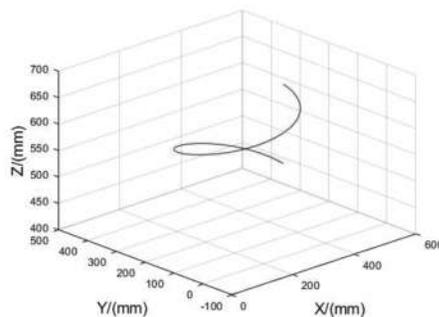


训练,增加了训练的有效性及肢体运动的协调性。

$$\begin{cases} x = 300 + 150 \cos(t) \\ y = 200 + 150 \sin(t) \\ z = 500 + 15t \end{cases} \quad (6)$$

利用S型曲线对螺旋形康复运动轨迹进行插值处理,结合康复训练机器人机构模型进行仿真验证,设定仿真时间为10s,得到末端运动轨迹如图10所示。从图中可以看出末端3D运动轨迹平滑,无跳动现象。

图10 末端3D运动轨迹



康复机器人旋转关节曲线如图 11 所示,角位移、角速度和角加速度曲线转折处无突变或跳动现象。平移关节的移动利用气压比例伺服控制,曲线如图 12 所示,位移、速度和

加速度曲线平滑,无突变或跳动现象,证明仿真过程中康复机器人运动平稳。

图 11 旋转关节曲线图

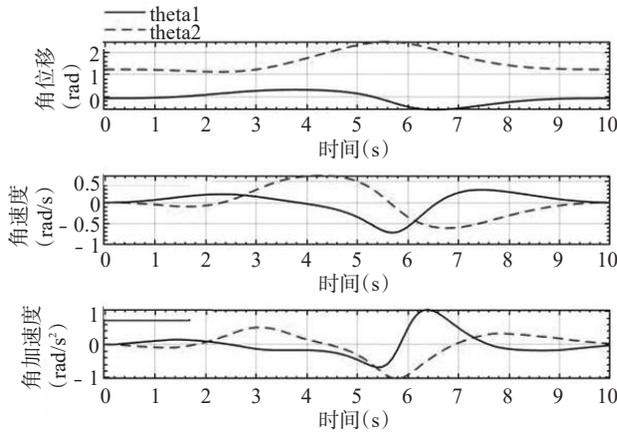


图 12 平移关节曲线图

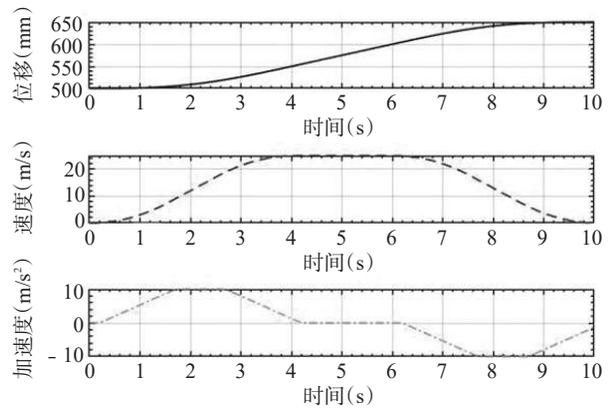


图 13 末端画圆动作实验



5 实验

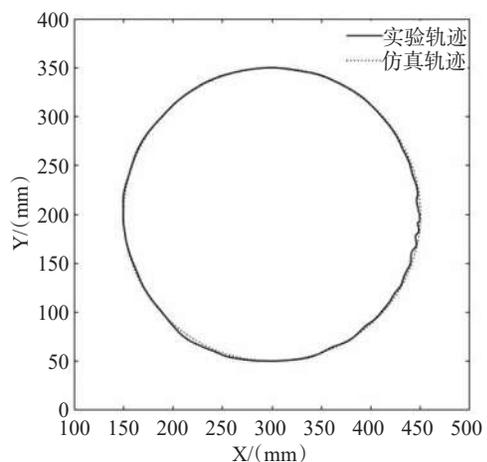
以平面画圆为例进行康复动作实验,如图 13 所示,测试者为健康中国男性,身高 1.73m,年龄 24 岁,大臂长 300mm,小臂长 240mm。实验时测试者手掌握于机器人样机末端手柄,手臂放于臂托之上。以轨迹规划时得到的仿真数据为期望康复轨迹,设定运动周期为 10s,在上肢康复训练机器人样机带动患者运动过程中进行数据采集与处理,得到康复机器人的末端轨迹如图 14 所示。

从图 14 中可以看出康复运动实验所得末端运动轨迹与仿真规划的运动轨迹基本相同,且未出现明显的扭拽等剧烈动作,说明整个上肢康复过程中机器人运动平稳,证明康复机器人结构设计合理、可行。

6 小结

基于康复医学中的人体关节运动学理论,从机构学角度设计的三维空间末端牵引式上肢康复机器人,解决了患者手臂三维空间内康复训练的柔顺性和安全性等问题。通过上

图 14 末端位置跟踪曲线



肢康复机器人运动学理论和人体上肢结构分析,运用 Matlab 求解出机器人的安全工作空间;依据康复医学中的作业疗法进行康复动作设计及末端轨迹规划,并进行仿真分析及实

验,结果验证了康复机器人结构的合理性,有助于下一步多种被动康复训练轨迹的设计以及人机交互控制的主动控制策略研究。

参考文献

- [1] 《中国脑卒中防治报告》编写组.《中国脑卒中防治报告2019》概要[J]. 中国脑血管病杂志, 2020, 17(5): 272—281.
- [2] 易金花, 张颖, 官龙, 等. 脑卒中患者上肢康复训练系统研究进展[J]. 中国康复, 2013, 28(4): 249—251.
- [3] 张小华, 曾媛媛, 王玉龙. 上肢康复机器人训练对脑卒中患者上肢功能的疗效观察[J]. 中国医学创新, 2017, 14(22): 29—31.
- [4] 顾琦, 田浩, 张芳芳, 等. 上肢康复机器人辅助治疗对改善脑卒中单侧忽略的疗效观察[J]. 中国康复医学杂志, 2020, 35(2): 166—170.
- [5] 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(9): 895—897.
- [6] Lee SH, Park G, Cho DY, et al. Comparisons between end-effector and exoskeleton rehabilitation robots regarding upper extremity function among chronic stroke patients with moderate-to-severe upper limb impairment[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 1806.
- [7] 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.
- [8] 陈朋举. 上肢康复机器人系统设计[D]. 长安大学, 2014.
- [9] 刘亚丽, 季林红. 基于Simulink的上肢康复训练人机整体建模与分析[J]. 生物医学工程学杂志, 2018, 35(1): 8—14.
- [10] Chang JJ, Tung WL, Wu WL, et al. Effects of robot-aided bilateral force-induced isokinetic arm training combined with conventional rehabilitation on arm motor function in patients with chronic stroke[J]. Archives of Physical Medicine and Rehabilitation, 2007, 88(10): 1332—1338.
- [11] 苑丹丹, 邓三鹏, 王仲民. 基于蒙特卡洛法的模块化机器人工作空间分析[J]. 机床与液压, 2017, 45(11): 9—12.
- [12] 程遥, 徐美英, 沈旭慧, 等. 作业疗法在临床护理中的应用现状[J]. 解放军护理杂志, 2017, 34(5): 44—48.
- [13] Mohamaddan S, Jamali A, Zainal Abidin A, et al. Development of upper limb rehabilitation robot device for home setting[J]. Procedia Computer Science, 2015, 76:376—380.
- [14] 杨延辉, 张洁, 贾杰. 抛投运动训练对脑卒中患者手及上肢功能改善的临床应用[J]. 中国康复医学杂志, 2019, 34(9): 1103—1105.
- [15] inb), 2019, 41: 44—50.
- [16] Héroux ME, Stubbs PW, Herbert RD. Behavior of human gastrocnemius muscle fascicles during ramped submaximal isometric contractions[J]. Physiol Rep, 2016, 4(17):e12947.
- [17] Toumi H, Lerguech G, Cherief M, et al. Implications of the calf musculature and Achilles tendon architectures for understanding the site of injury[J]. J Biomech, 2016, 49: 1180—1185.
- [18] Mogi Y, Torii S, Kawakami Y, et al. A cross-sectional study on the mechanical properties of the Achilles tendon with growth[J]. Eur J Appl Physiol, 2018, 118: 185—194.
- [19] Dayton P. Anatomic, vascular, and mechanical overview of the Achilles tendon[J]. Clinics in Podiatric Medicine and Surgery, 2017, 34(2):107—113.
- [20] Millar AP. Strains of the posterior calf musculature ("tennis leg")[J]. Am J Sports Med, 1979, 7: 172—174.
- [21] Riemann BL, Limbaugh GK, Eitner JD, et al. Medial and lateral gastrocnemius activation differences during heel-raise exercise with three different foot positions[J]. J Strength Cond Res, 2011, 25(3):634—639.
- [22] Arampatzis A, Karamanidis K, Albracht K. Adaptational responses of the human Achilles tendon by modulation of the applied cyclic strain magnitude[J]. The Journal of Experimental Biology, 2007, 210: 2743—2753.
- [23] Herbert RD, Clarke J, Kwah LK, et al. In vivo passive mechanical behaviour of muscle fascicles and tendons in human gastrocnemius muscle-tendon units[J]. J Physiol, 2011, 589: 5257—5267.
- [24] Farcy S, Nordez A, Dorel S, et al. Interaction between gastrocnemius medialis fascicle and Achilles tendon compliance: a new insight on the quick-release method[J]. Journal of Applied Physiology, 2014, 116(3):259—266.
- [25] Park DS, Kwon DR, Park GY, et al. Therapeutic effect of extracorporeal shock wave therapy according to treatment session on gastrocnemius muscle spasticity in children with spastic cerebral palsy: a pilot study[J]. Ann Rehabil Med, 2015, 39(6):914—921.
- [26] Hirata K, Kanehisa H, Miyamoto N. Acute effect of static stretching on passive stiffness of the human gastrocnemius fascicle measured by ultrasound shear wave elastography[J]. Eur J Appl Physiol, 2017, 117(3):493—499.
- [27] Crill MT, Berlet G, Hyer C. Plantar flexor muscle architecture changes as a result of eccentric exercise in patients with achilles tendinosis[J]. Foot & Ankle Specialist, 2014, 7(6):460—465.

(上接第1413页)