



WAM 机器人辅助上肢康复训练技术应用研究

摘要

运用 WAM 机器人辅助偏瘫上肢进行康复训练,从机器人运动参数和传统医学评估方法两方面分析验证康复训练的有效性.基于 WAM 机器人搭建实验平台,设计“十”字和“米”字康复训练方式,添加趣味性游戏,招募上肢偏瘫患者跟踪进行康复训练与评估.采集 WAM 机器人的轨迹和转矩信息,分析康复训练前后轨迹跟踪误差和转矩变化,评价患肢的运动功能,同时由康复医师运用传统评估法 Brunnstrom 等级分期法进行康复评估.实验结果显示,经过 1 个月的康复训练,机器人轨迹跟踪误差减小,转矩波动变化趋于平缓,患肢随意运动减少,评估 Brunnstrom 等级有所提升,且效果优于传统康复训练.研究结果表明 WAM 机器人辅助康复训练科学合理,康复效果优于传统康复训练方法.

关键词

康复机器人;康复训练;运动功能;评估

中图分类号 R743

文献标志码 A

收稿日期 2021-04-22

资助项目 南京工程学院引进人才科研启动基金(YKJ2019113);江苏省仪器仪表学会智能医疗器械创新基金(2020年);江苏省高等学校自然科学研究面上项目(19KJB510004)

作者简介

白敬,女,博士,讲师,研究方向为康复机器人.baijing@njit.edu.cn

0 引言

由脑卒中、脑外伤、脊髓损伤等疾病引起的上肢偏瘫患者日益增多^[1],他们亟待进行康复治疗.传统的上肢康复训练方式主要通过康复医师帮助或者由简单的器械牵引患肢辅助康复训练,但很难确保康复运动训练的时间长度、训练强度和规范性,不易达到满意的治疗效果^[2].由于康复科室少和康复装备供应不足,大部分患者不能及时、正确地进行康复训练,使得不少上肢偏瘫患者难以康复.随着人们健康意识的不断增强,康复医疗需求不断增加.机器人辅助康复治疗持续性和重复性好,可提供科学有效的康复训练方法,改善康复训练效果^[3].

国内外学者对康复机器人进行了大量研究,如美国麻省理工学院研制的模块化康复训练机器人 MIT-MANUS^[4]、美国 Motorika 公司(<http://motorika.com/reogo/>)研制的多种训练模式上肢康复机器人 Reo Go、Washabaugh EP 等研制的便携式平面康复机器人 PaRRo^[5]、Atashzar 等^[6]研究的基于虚拟环境的触觉康复机器人 HRR、2005 年瑞士苏黎世大学研制的一款典型上肢外骨骼康复机器人 ARMin^[7]、华盛顿大学研制的线驱动七自由度外骨骼式机器人 CADEN-7^[8]等.近年来外骨骼康复机器人的发展较快,国内外学者研究较多,如基于气动肌肉驱动的五自由度可穿戴式上肢外骨骼 RUPERT^[9]、基于转矩可控的串联弹性驱动器外骨骼机械臂 ANYexo^[10]、七自由度电缆驱动外骨骼机械臂 CAREX-7^[11]、基于弹性驱动器的四自由度肩肘关节外骨骼 NESM^[12]等.但对机器人康复训练效果的研究相对较少.康复效果是验证康复训练方法可行性的重要一环,因此对康复训练效果的研究必不可少.

康复评估是制定康复治疗的基础,也是观察其治疗效果的客观标准,对康复治疗、评估治疗疗效、预测功能恢复均有重要的作用^[13].目前,脑卒中幸存者的运动功能和治疗干预的效果通常由治疗师使用临床评估量表来评估.机器人衍生的测量技术,可以为患者行为提供客观精确的测量^[14].

本研究运用 WAM 机器人对上肢偏瘫病人进行康复训练,对其康复过程进行跟踪,分析运动参数,评价康复效果,同时运用医学评估 Brunnstrom 等级分期法进行康复评估,分别从机器人运动参数和传统医学评估方法两方面分析,验证 WAM 机器人进行上肢康复训练的有效性.

1 南京工程学院 智能装备产业技术研究院, 南京,211167

2 南京工程学院 江苏省智能制造装备工程实验室,南京,211167

3 南京中电熊猫平板显示科技有限公司,南京,210033

4 南京工程学院 汽车与轨道交通学院,南京,211167

1 方法

1.1 康复训练方式

在中风患者康复的过程中,康复训练的方法尤为重要,设计合理的康复训练方式,有助于中风患者的早日康复.根据上肢日常活动范围,考虑患者中风后肢体的运动范围及病人的承受能力,针对有一定活动能力的患者,在保证安全的前提下,设计上肢末端的“十”字与“米”字运动,即患者手部抓握机械臂末端手柄,机械臂牵引上肢在空间范围内写“十”字与“米”字,以达到训练上肢的目的.

为使康复训练变得生动有趣,设计相关虚拟场景以提高患者参与康复训练的积极性.采用 Kinect 采集手部位置信息,控制虚拟篮子接物体,设计各种形状的物体,包括三角形、四边形、五边形、六边形、五角星等,从屏幕上方随机掉落,篮子接到物体得分.受试者在进行医院常规训练的同时,进行为期 1 个月的机器人康复训练,每周 5 次,每次 30 min,每周记录 1 次康复训练结果,以验证康复训练的有效性.康复训练前后,康复评估师分别对每个受试者进行康复评估,比较机器人康复训练和传统康复训练的效果.

1.2 机器人控制方法

在康复训练过程中,上肢康复机器人与患肢直接接触进行交互,患者的安全非常重要,这就需要实时监测机器人末端与患肢之间的相互作用力,并保持系统的稳定性.在控制方法中,阻抗控制具有一定的优势,能较好地通过调节机器人的位置偏差与末端力的动态关系来控制机器人的位置和力.本文所采用的 WAM 康复机器人系统的目标阻抗控制模型

如下:

$$M_d(\ddot{q}_d(t) - \ddot{q}(t)) + C_d(\dot{q}_d(t) - \dot{q}(t))\dot{q} + K_d(q(t) - q(t)) = F_d(t) - F_e(t), \quad (1)$$

式中: $M_d(q) \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 为目标惯性矩阵,它对高速运动(即具有较大的加速度或冲击力的运动)具有很大的影响,在缓慢的康复训练过程中可以忽略不计; $C_d(q, \dot{q}) \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 为机器人的目标阻尼矩阵,当机器人以中速运动或受到强扰动时,它对受力有很大的影响; $K_d \in \mathbf{R}^n$ 表示机器人的目标刚度矩阵,它对平衡态附近的低速运动有很大影响; q, \dot{q}, \ddot{q} 分别表示 WAM 康复训练机器人末端的角度、角速度和角加速度矢量; $q_d, \dot{q}_d, \ddot{q}_d$ 分别表示期望角度、期望角速度和期望角加速度矢量; F_d 表示机器人末端与患肢之间期望的相互作用力; $F_e(t)$ 是环境力.

在实际的康复训练中,为机器人阻抗控制模型选择合适的参数是非常重要的.通常情况下参数可以通过自适应方法、神经网络学习方法或从示教数据中获得.本文采用自适应模糊反演的方法对阻抗控制模型的参数进行优化.图 1 为基于自适应模糊反演的阻抗控制系统框图,具体控制方法的设计见参考文献[15].

1.3 数据采集与处理

WAM 机器人牵引上肢偏瘫病人患肢进行“十”字和“米”字运动,机器人各关节安装位置传感器和转矩传感器,记录每位受试者康复训练时机器人的位置和转矩信息并分析,以反映受试者康复训练情况.分析康复训练前后的轨迹跟踪误差的绝对值及其最大值和最大绝对转矩及其变化率,来评价患肢的运动功能.在康复训练 1 个月后,康复评估医师运用 Brunnstrom 等级分期法分别对受试者的患肢运动

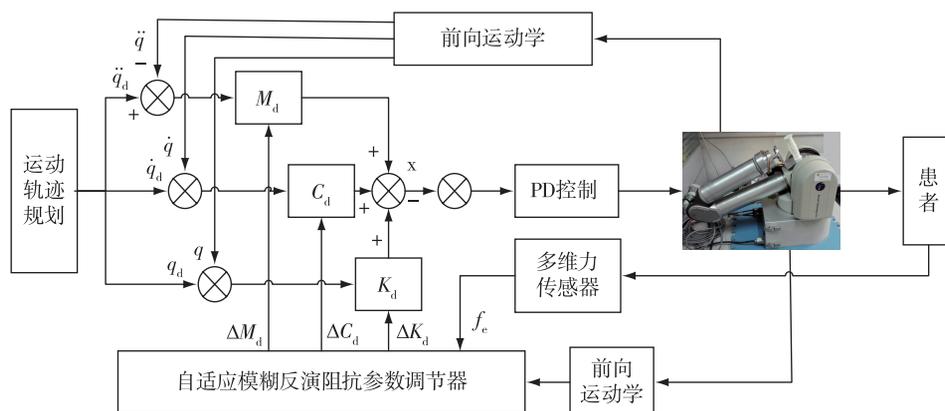


图 1 基于自适应模糊反演的阻抗控制系统框图

Fig. 1 Backstepping adaptive fuzzy based impedance control system

功能进行评估,记录患肢运动功能等级,对比康复训练前后受试者的康复情况。

2 实验

2.1 实验装置

本实验上肢康复机器人系统由四自由度 WAM 机械臂、三维力传感器、手柄、主机构建而成。机械臂是由美国 barrett 公司生产的标准 4-DOF WAM 机械臂,可反向驱动,采用钢丝绳直接驱动各个关节,机械臂通过 CAN 总线与外部 PC 进行数据传输。三维力传感器采用整体轮辐式十字梁结构,底端底盖通过法兰盘与机械臂相配合连接。手柄通过 3D 打印的方式获取实物,安装在柄托上,通过法兰盘与传感器顶柱的销孔相连接,固定于 WAM 机械臂的末端,以方便受试者抓握。运用 Kinect 相机采集受试者上肢位置信息,搭建虚拟环境,提高康复训练的趣味性,增加受试者康复训练的积极性。

2.2 受试者

临床康复训练试验在南京同仁医院康复医学科进行,选取住院治疗的偏瘫患者为受试者,进行 1 个月的跟踪训练与评估。病例筛选标准如下:

1) 纳入标准:符合 1995 年全国第 4 届脑血管病学术会议通过的《各类脑血管病诊断要点及脑卒中

患者临床神经功能缺损程度评分标准》,并经临床确诊的初发脑卒中患者,均存在肢体运动功能障碍,无严重的认知障碍和精神疾病,生命体征稳定。

2) 排除标准:发病前有精神疾病,卒中前已有痴呆表现,严重的认知障碍及失语,或伴有心、肺、肝、肾等重要器官严重疾病,有影响功能恢复的神经肌肉骨骼病变,临床不能配合治疗者。

根据上述标准,最终筛选出 6 例病例接受实验,其中男患者 4 例、女患者 2 例,详细情况如表 1 所示。同时筛选 4 例患者进行对比试验,即这 4 例患者只进行传统的康复训练。所有筛选病例均自愿参与并配合试验。

在试验展开前,医护人员对试验的内容及安全性进行了测试,确保患者的安全。本研究提供的康复训练不会对患者产生副作用,符合南京同仁医院伦理委员会及相关机构的要求。

3 实验结果与分析

3.1 机器人训练结果与分析

康复训练实验场景如图 2 所示,受试者在进行康复训练。取一例受试者的康复训练信息进行分析,结果如图 3、图 4 所示。图 3 为“十”字康复训练结果,其中图 3a 为关节误差 2,图 3b 为关节转矩 2,图 3c

表 1 受试者基本信息

Table 1 Patients' information

病例编号	年龄	性别	患病时间/月	中风原因	Brunnstrom 分期等级	患肢侧
1	62	男	7	脑溢血	1	右
2	55	男	2	脑梗塞	2	右
3	39	男	5	脑梗塞	3	左
4	39	女	3	脑溢血	3	左
5	73	女	12	高血压	4	右
6	32	男	8	脑梗塞	4	右

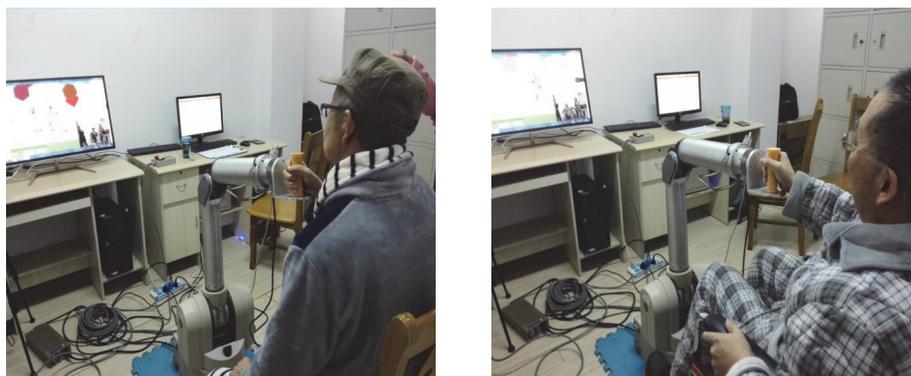


图 2 实验场景

Fig. 2 Experimental scene

为关节误差3,图3d为关节转矩3.图中蓝色实线为第1次康复训练结果,红色实线为1个月之后的康复训练结果.从图3a和3c中可以看出,经过1个月的康复训练,受试者康复训练时的关节误差有所降低,误差波动减少减弱,绝对峰值呈降低趋势;从图3b和3d中可以看出,康复训练1个月后机器人检测的转矩大小呈减弱状态,转矩变化率降低.

为进一步说明机器人康复训练后的效果,对该患者训练的轨迹跟踪误差和转矩信息进行分析,求解轨迹跟踪误差绝对峰值、最大误差变化率、最大绝对转矩和最大绝对转矩变化率,“十”字康复训练结

果如表2所示.由表2可知,机器人康复训练后,受试者康复训练时的误差总体变化减小,误差绝对峰值下降,最大误差变化率减少,患肢病情的不确定性对康复训练过程的干扰减少,最大绝对转矩降低,最大绝对转矩变化率减少,患肢的康复训练前由于肢体不受控制,存在频繁颤动,康复训练后,颤动减少,肢体功能增强,康复训练运动过程更加稳定.

图4为“米”字康复训练结果,其中图4a为关节误差2,图4b为关节转矩2,图4c为关节误差3,图4d为关节转矩3.图中蓝色实线为第1次康复训练结果,红色实线为1个月之后的康复训练结果.从图

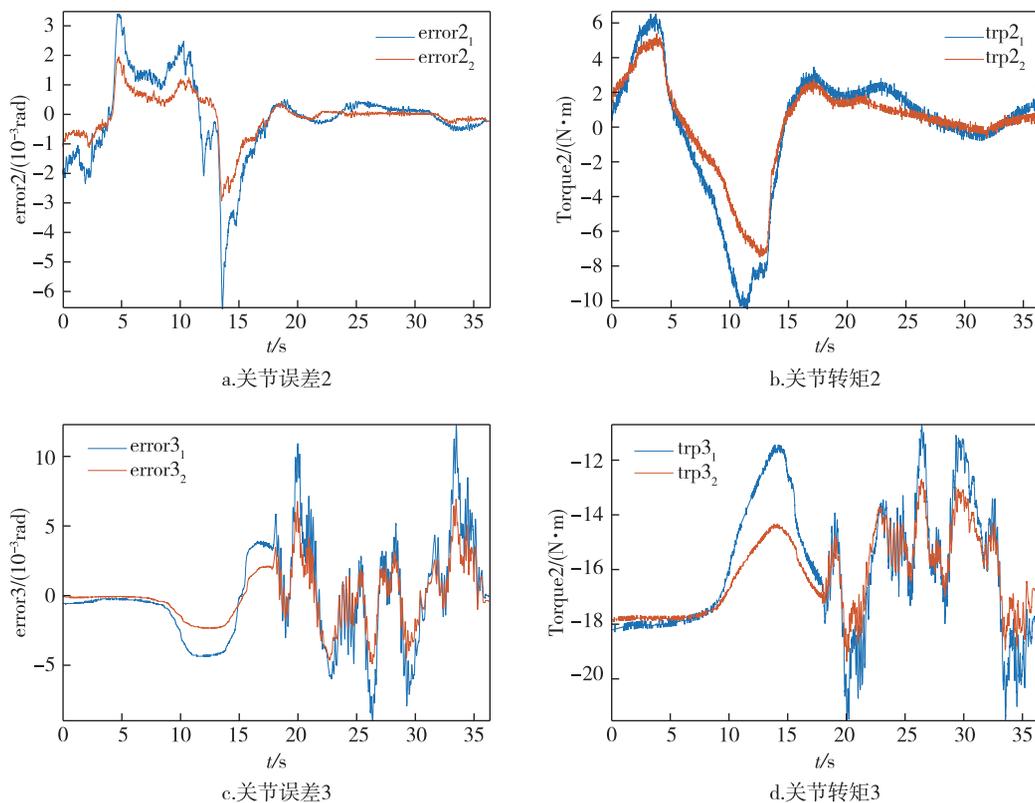


图3 “十”字康复训练结果

Fig. 3 Performance of rehabilitation training by marking cross with upper limb, (a) joint error 2 (b) joint torque 2, (c) joint error 3, and (d) joint torque 3

表2 “十”字康复训练

Table 2 Performance of rehabilitation training by marking cross with upper limb

误差类别	时间	误差绝对峰值/ rad	最大误差变化率/ ($rad\cdot s^{-1}$)	最大绝对转矩/ ($N\cdot m$)	最大绝对转矩变化率/ ($N\cdot m\cdot s^{-1}$)
关节2误差	起始	0.006 6	0.000 260	10.396 7	0.973 954
	结束	0.002 9	0.000 111	7.403 9	0.835 970
关节3误差	起始	0.012 4	0.000 896	21.837 2	0.860 675
	结束	0.007 1	0.000 545	19.600 1	0.706 094

注:起始表示机器人康复训练前,结束表示机器人进行1个月康复训练之后.

4 中可以看出,在康复训练开始时,机器人牵引患者手臂康复训练时的误差,即图 4a 和 4c 中蓝色实线,均有比较尖锐的峰值,变化趋势陡峭、锯齿状明显,康复训练后误差峰值降低,波动有所变缓;转矩在康复训练前后变化比较明显,图 4b 和 4d 中的红色实线直观显示转矩最大绝对值明显降低,且波动变化趋于平缓。

表 3 为“米”字康复训练后的结果分析.由表 3 可知,康复训练后误差绝对峰值下降,最大误差变化率减少,患肢更能跟随机器人的康复轨迹.同时最大绝对转矩降低,最大绝对转矩变化率减少,患肢的康

复训练变得更加柔顺,随意运动减少。

3.2 康复医师评估结果与分析

受试者在接受康复训练之前,康复医师对每位受试者进行康复评估,评定每位受试者的 Brunnstrom 分期等级,评估结果如图 5 中蓝色条形所示,接受 1 个月的康复训练后,每位受试者的康复程度评估结果如图 5 中橙色条形所示.图 5a 表明参与机器人康复训练的患者 Brunnstrom 分期等级增加更加明显,各位受试者患肢情况都有所好转,其中受试者 2 和受试者 4 的 Brunnstrom 分期等级增加较多.图 5b 表明传统康复训练中受试者 Brunnstrom 分期

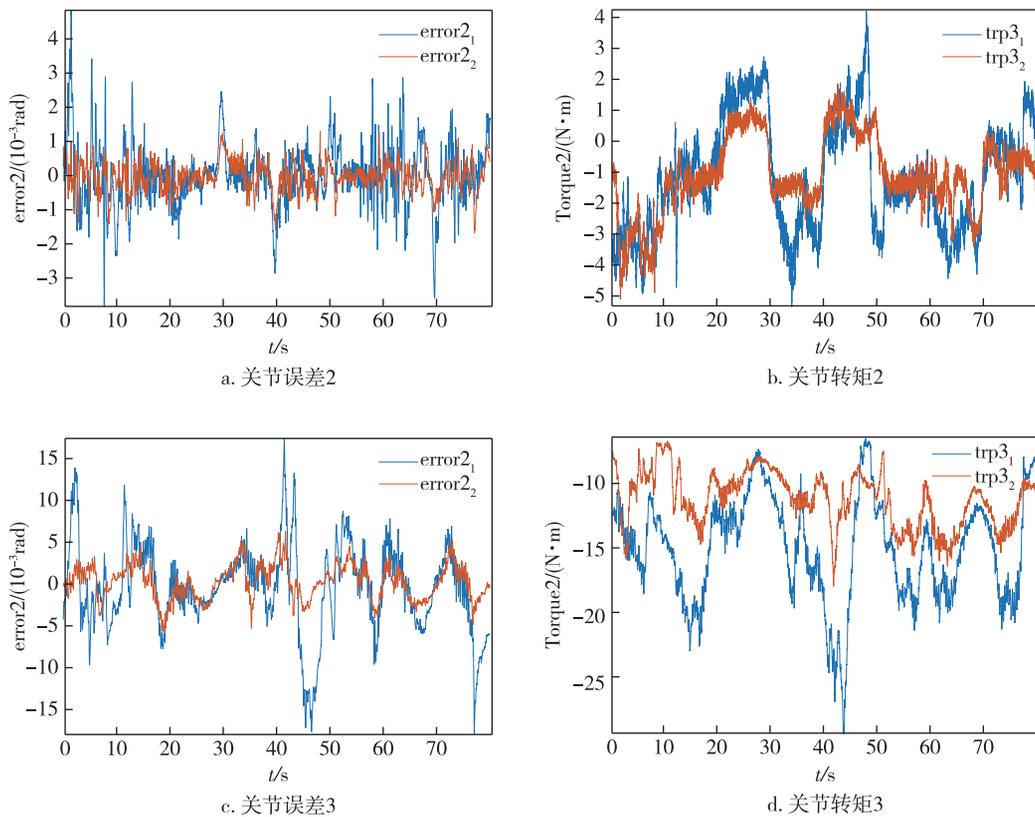


图 4 “米”字康复训练结果

Fig. 4 Performance of rehabilitation training by marking “*” with upper limb, (a) joint error 2, (b) joint torque 2, (c) joint error 3, and (d) joint torque 3

表 3 “米”字康复训练

Table 3 Performance of rehabilitation training by marking “*” with upper limb

误差类别	时间	误差绝对峰值/ rad	最大误差变化率/ (rad·s ⁻¹)	最大绝对转矩/ (N·m)	最大绝对转矩变化率/ (N·m·s ⁻¹)
关节 2 误差	起始	0.004 822	0.001 030	5.359 873	1.120 375
	结束	0.001 689	0.000 574	5.112 656	0.683 954
关节 3 误差	起始	0.017 811	0.001 775	29.324 250	0.746 062
	结束	0.006 262	0.001 294	17.923 500	0.614 337

注:起始表示机器人康复训练前,结束表示机器人进行一个月康复训练之后。

等级增加较少,其中受试者 1 和受试者 4 的 Brunnstrom 分期等级没有增加.由图 5 可知 WAM 机器人的康复训练效果优于传统的康复训练.

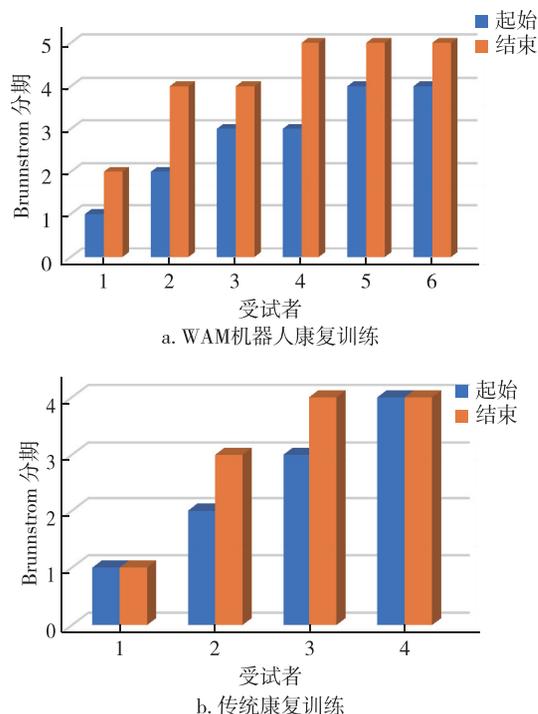


图 5 康复评估医生评估结果

Fig. 5 Rehabilitation performance appraised by doctors, (a) robot-assisted rehabilitation training, and (b) conventional rehabilitation training

4 结束语

本研究运用 WAM 机器人平台对上肢偏瘫患者进行为期 1 个月的康复训练,分析康复训练前后 WAM 机器人牵引患者进行康复训练时的关节误差与转矩,并对康复训练前后患者的 Brunnstrom 分期等级进行评定,结果表明接受 WAM 机器人康复训练患者的康复进度优于传统康复训练,WAM 机器人可为中风患者提供合理的康复训练方式.

参考文献

References

[1] 胡盛寿,高润霖,刘力生,等.《中国心血管病报告 2018》概要[J].中国循环杂志,2019,34(3):209-220
HU Shengshou, GAO Runlin, LIU Lisheng, et al. Summary of the 2018 report on cardiovascular diseases in China[J]. Chinese Circulation Journal, 2019, 34(3): 209-220

[2] Jacob B, Lynley V B, Sheila L, et al. A review of rehabilitation devices to promote upper limb function following

stroke[J]. Neuroscience and Biomedical Engineering, 2016, 4(1): 25-42

[3] Mortazavi F, Nadian-Ghomsheh A. Continues online exercise monitoring and assessment system with visual guidance feedback for stroke rehabilitation[J]. Multimedia Tools and Applications, 2019, 78(22): 32055-32085

[4] Krebs H I, Volpe B T, Williams D, et al. Robot-aided neurorehabilitation: a robot for wrist rehabilitation[J]. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 2007, 15(3): 327-335

[5] Edward W, Guo J, Chang C K, et al. A portable passive rehabilitation robot for upper-extremity functional resistance training[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2019, 66(2): 496-508

[6] Atashzar S F, Shahbazi M, Tavakoli M, et al. A passivity-based approach for stable patient-robot interaction in haptics-enabled rehabilitation systems: modulated time-domain passivity control[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2017, 25(3): 991-1006

[7] Nef T, Riener R. ARMin-design of a novel arm rehabilitation robot[C] // International Conference on Rehabilitation Robotics, 2005: 57-60

[8] Perry J C, Rosen J, Burns S. Upper-limb powered exoskeleton design[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2007, 12(4): 408-417

[9] Huang J, Tu X K, He J P. Design and evaluation of the RUPERT wearable upper extremity exoskeleton robot for clinical and in-home therapies[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2016, 46(7): 926-935

[10] Zimmermann Y D, Forino A, Riener R, et al. ANYexo: a versatile and dynamic upper-limb rehabilitation robot[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2019, 4(4): 3649-3656

[11] Cui X, Chen W H, Jin X, et al. Design of a 7-DOF cable-driven arm exoskeleton (CAREX-7) and a controller for dexterous motion training or assistance[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2017, 22(1): 161-172

[12] Trigili E, Crea S, Moisè M, et al. Design and experimental characterization of a shoulder-elbow exoskeleton with compliant joints for post-stroke rehabilitation[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2019, 24(4): 1485-1496

[13] 励建安,黄晓琳.康复医学[M].北京:人民卫生出版社,2016
LI Jianan, HUANG Xiaolin. Rehabilitation medicine[M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2016

[14] Lowrey C R, Bourke T C, Bagg S D, et al. A postural unloading task to assess fast corrective responses in the upper limb following stroke[J]. Journal of Neuroengineering and Rehabilitation, 2019, 16(1): 16

[15] Bai J, Song A G, Wang T, et al. A novel backstepping adaptive impedance control for an upper limb rehabilitation robot[J]. Computers & Electrical Engineering, 2019, 80(1): 106465

WAM robot-assisted upper limb rehabilitation training technology

BAI Jing^{1,2} ZHANG Jinmin³ SUN Huiyu⁴ WANG Baosheng^{1,2}

1 Industrial Technology Research Institute of Intelligent Equipment, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167

2 Jiangsu Provincial Engineering Laboratory of Intelligent Manufacturing Equipment, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167

3 Nanjing CEC Panda FPD Technology Co., Ltd., Nanjing 210033

4 School of Automobile and Rail Transit, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167

Abstract This study aims to evaluate a WAM robot-assisted rehabilitation training technology targeted for improving arm function from aspects of robot kinematic parameters and traditional medical assessment. The experimental platform with WAM robot is built to assist the upper limb hemiplegia patients in marking some simple shapes or doing some interesting games with their upper limbs. Data of trajectory and torque of the WAM robot are collected, and the trajectory tracking error and torque change before and after rehabilitation training are analyzed to evaluate the upper limb function. At the same time, physicians use Brunnstrom levels to appraise the rehabilitation performance. The results show that one month rehabilitation training reduces the robot trajectory tracking error and the torque change, as well as improves the upper limb function indicated by the reduction in random limb movement and rise in Brunnstrom level. This study provides evidence on the effectiveness of the WAM robot-assisted rehabilitation training in improving upper limb's motor function, which is superior to conventional rehabilitation training.

Key words rehabilitation robot; rehabilitation training; motor function; evaluation