

基于上肢康复机器人的人机交互软件系统设计与实现

孟巧玲^{1,2,3} 汪晓铭^{1,2,3} 郑金钰^{1,2,3} 周深^{1,2,3} 孙梦真^{1,2,3} 喻洪流^{1,2,3}

¹上海理工大学康复工程与技术研究所,上海 200093; ²上海康复器械工程技术研究中心,上海 200093; ³民政部神经功能信息与康复工程重点实验室,上海 200093

通信作者:喻洪流,Email:yhl98@hotmail.com

【摘要】 为解决现有上肢康复机器人人机交互系统重治疗、轻评估的弊端,本课题以中央驱动上肢康复机器人为研究对象,设计一种基于 Qt、数据库(MYSQL)和虚拟现实技术,并集成用户信息管理、康复评定、康复训练、生成康复报告等功能模块为一体的医-机-人三者交互系统。通过功能测试验证了结合训练与评估系统的上肢康复机器人系统,发现其不仅能提高康复治疗师工作效率,同时也为患者提供了一种高效、富有趣味性的康复训练模式。

【关键词】 人机交互; 康复评定; 康复训练

基金项目:上海市科技支撑项目(16441905102)上海市科技支撑项目(16441905202)

Fund program: Science and Technology Innovation Action Plan of Shanghai(16441905102); Science and Technology Innovation Action Plan of Shanghai(16441905202)

DOI:10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2019.05.020

偏瘫是脑卒中患者最常见后遗症,表现为一侧肢体功能障碍。引起偏瘫的主要原因是脑卒中导致大脑与末端肢体失联,肢体无法获得运动信号。相关研究表明,能有效治疗脑卒中后偏瘫的训练方法是强调患者主动参与和有控制性的运动训练,从而帮助大脑进行神经组织重塑。传统康复干预由康复治疗师实施康复治疗,协助患者进行肢体运动。由于康复过程需要进行大量重复性运动,患者主观参与意识较低,治疗师无法及时获得直观数据反馈,对训练强度、训练总量等无法度量,难以将患者康复运动与心理重建有机结合,也无法量化评定康复训练效果。

随着机器人技术和人机交互技术发展,上肢康复机器人结合康复评定和虚拟训练等功能的软件系统将得到广泛应用。康复训练通常与虚拟现实游戏相结合,可通过生动有趣的视觉体验,获得失败或成功的反馈,大脑对反馈信息做出判断,并调整运动模式,形成优化的神经网络及运动程序,支配相关肌肉以特定顺序、速度和力量运动,可改善大脑适应能力、前馈能力和协调能力^[1],通过不断强化、重复的任务导向性训练,能更好地促进患者功能恢复^[2]。国内、外已有研究证实这一训练方式能有效改善脑卒中患者偏瘫上肢运动功能^[3-4]。

国内、外现有上肢康复机器人的交互方式主要包括按键控制、操纵杆控制、鼠标、键盘控制、触摸屏控制、表面肌电信号以及组合方式控制等^[5],反馈形式包括听觉、视觉、触觉等。此类交互方式往往是为触发或控制患者康复训练而设计的,注重患者在康复训练过程中的即时响应、直观反馈及参与程度,但患者功能改善情况无从知晓。究其原因包括:现有的上肢康复训练人机交互系统往往重治疗、轻评估,缺少康复评估功能;或是评估指标单一,缺少综合评价分析,具有康复评估功能的商业化产品很少,且大都只测量关节活动度,不具备认知评估功能。因此本研究基于 Windows 平台设计了一套应用于上肢康复机器人康复评定及训练的人机交互系统,为康复治疗师提供便捷

的人机交互操作界面,并设计一套适用于上肢康复机器人的上肢康复评定方法,为康复计划制订提供依据,并结合虚拟现实游戏对患者进行康复训练,同时实时监测并保存患者康复数据,通过图表直观展示当前康复状态及阶段性康复成果。

总体设计

依据人机交互的图形用户界面设计原则,本研究设计了共计 10 个交互主界面,包括登录页面、患者管理页面、选择页面、评估页面、康复计划制订页面、管理中心、设备管理等功能界面,系统模块结构如图 1 所示。

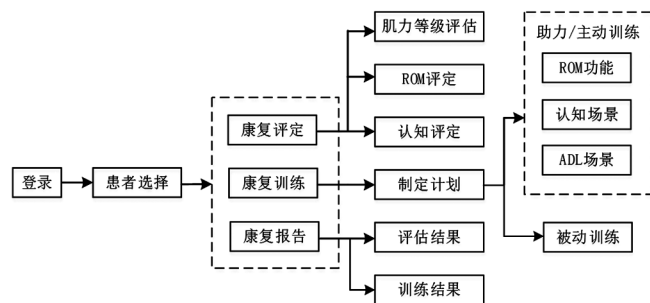


图 1 上肢康复评估及训练系统的模块结构图

系统功能设计与实现

一、数据存储设计

本系统采用 MySQL 数据库^[5],根据上肢设备自身功能和训练过程中参数及其他业务需求分析,数据库中有以下 6 张表,包括:_user(用户信息表),对应系统功能的不同权限,有医生、患者两个角色,包含姓名、密码、性别、职级、受损位置、联系方式等字段;_rehabplan(康复训练计划表),包含训练时间、结束时间、游戏类型等字段;_assessment(评估表),用来存放各关

节活动角度范围;_report(康复报告表),记录患者每次训练过程中的一些参数;_game(游戏表),包含游戏名称、时间、等级、得分等字段;_hospital(医院信息表),包含医院名称、所在城市、地址、等级字段等。

二、数据通信设计

1.串口通信:Qt 对串口的操作集成在 QSerialport 类中,在新建工程时需选择 QSerialport 选项或添加依赖项,就可直接使用该类实现串口通信,可利用 QSerialPortInfo 类帮助应用程序获取有关可用串行端口的相关信息,有助于获取要使用串行端口的正确名称。本系统客户端和上肢康复机器人之间通过串口实现 Modbus 通信协议,Modbus 协议下的数据通信采用 Master/Slave(主/从)方式,即 Master 端发出数据请求消息,Slave 端接收到正确消息后返回响应数据到 Master 端;Master 端也可直接发消息修改 Slave 端数据,从而实现双向读写^[7]。客户端作为主站,读取从站数据的功能码为 0x03(表 1),向从站写数据的功能码为 0x10(表 2)。

表 1 读取从站数据的数据通信协议格式

PLC 栈号	功能码	寄存器 起始地址	寄存器 数量	CRC 校验
Xxxx	0x03	xxxx	Xxxx	xxxx

表 2 向从站写数据的数据通信协议格式

PLC 栈号	功能码	寄存器 起始地址	寄存器 数量	字节数	寄存器 内容		CRC 校验
xxxx	0x10	xxxx	xxxx	Xxxx	xxxx		xxxx

2.Socket 通信:本系统中客户端和游戏在运行时分属两个不同进程,通过 Socket 方式进行通信,客户端作为 Socket server,游戏作为 Socket client。Socket 有基本操作如绑定、监听、连接、接受连接、释放套接字等。在 Qt 中,这些操作都封装在 QTcpServer 类中,通过定义类的对象可以调用相关函数(表 3)。

表 3 PC 客户端与游戏之间的数据通信协议格式

帧头	长度	指令	数据		帧尾
0x3F	xxx	Xxx	xxx		0x3F

三、康复评定设计

制订适用于上肢康复机器人的康复评估方案,能为患者提供更加有效的康复训练方案。现有的康复机器人配套软件系统大多是重训练、轻评估,而具备康复评估功能的软件系统大多有各自独立的评估指标,缺少系统综合评估,而康复训练也多是针对关节活动度的单一训练。

通过对患者及康复治疗师进行问卷调查分析,本系统结合上肢康复机器人固有特征,选取 3 个方面对患者进行康复评估,一是运动障碍评估,通过测量关节活动度实现;二是肌力等级评估,录入肌力等级 Lovett 分级法评分标准,这是临床上常用的徒手肌力评估方法,康复治疗师可根据患者自身状况选择是否需要此项评估;三是认知功能筛查。认知功能筛查系统录入了简易智力状况检查量表(mini-mental state examination, MMSE)内容,MMSE 因其简易快速、可操作性强和易被患者接受等突出特点在临床得到广泛应用,目前我国临床使用率高

达 82.1%^[8]。治疗师可根据患者认知评定结果,选择带有认知内容的游戏训练项目,通过综合训练提高康复效率。图 2 为认知评估界面。

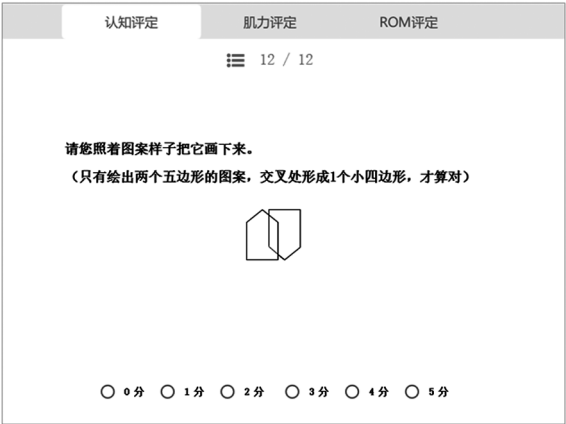


图 2 认知评估界面

关节活动度评估通过上肢康复机器人设备自动测量,经串口通信技术传至本系统。目前根据该设备提供的数据可进行肩关节屈曲/伸展角度测量、肩关节外展/内收角度测量、肘关节屈曲/伸展角度测量等。由评估得到的关节活动数据将作为康复游戏训练中的关节极限活动范围,另外游戏训练界面的视觉反馈对于活动能力较差患者不会造成心理落差,有助于维持训练兴趣。图 3 为关节活动度评估界面示意图,左侧是示例图片,右侧显示上肢康复机器人控制系统上传的实时关节角度数据。

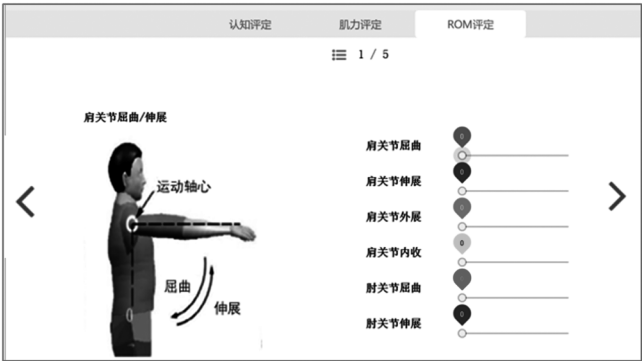


图 3 ROM 评估界面

肌力评估目前有手法评估和器械检查两种,本系统选用 Lovett 分级法评估,属于手法检查,如图 4 所示,治疗师无需借助辅助器械,通过评估确定患者自主训练时肌力强度,对于肌力较弱患者,在后续康复治疗计划中可选择被动模式或助力模式,适当增加辅助,帮助患者充分发挥上肢残存功能,增强患者对康复治疗的信心。肌力评估界面主要由 4 个 Column 布局完成,因为同一列布局的属性一样,因此使用了 Repeater 控件。Repeater 控件多用于创建大量类似的项目,与其他视图类型一样,Repeater 具有 1 个模型和 1 个委托等特点,对于模型中的每个条目,委托在来自模型数据的上下文中被实例化。一个 Repeater 项目通常被包含在一个定位器类型(如 Row 或 Column)中,Repeater 能创建多个委托项目。



图 4 肌力评估界面

四、康复训练游戏设计

脑卒中患者治疗分为软瘫期、痉挛期、康复期 3 个阶段,在软瘫期以被动康复训练为主,痉挛期主要为患者半主动康复训练,康复期则以主动训练为主^[9]。本系统根据患者肌力及 ROM 综合评定结果提供被动训练、助力训练和主动训练 3 种训练模式;根据治疗目标可分为日常生活活动(activities of daily living, ADL)能力和生活质量康复训练、认知和情绪障碍康复训练、运动机能平衡障碍康复训练等;根据运动模式不同,可分为一维水平面游戏、二维复合游戏及三维复合游戏。

经上海市第一康复医院临床实践调研,脑卒中偏瘫患者以老年人为主,不宜剧烈运动,以免造成二次损伤,故设计游戏训练方案时要考虑老年人心智及认知状态,不宜过于复杂绚丽;此外将虚拟现实游戏引入上肢功能康复训练^[10-11]的重点是要为患者提供生动有趣的虚拟现实训练项目,增强患者沉浸感。归纳患者感兴趣的虚拟现实游戏训练项目通常具有以下几个特点:一是任务明确、奖惩得当,以激励为主;二是内容、游戏场景要完整丰富,使患者觉得生动有趣;三是难度,游戏难度不宜过高,使患者有成就感。本研究根据上述需求设计了以下 6 款游戏场景,如表 4 所示,每款游戏有相应从 Level1-Level5 共 5 个等级的任务量及场景复杂度划分。

五、康复报告设计

康复报告由功能评定和虚拟训练两部分组成,使用了高速绘图控件 High-Speed Charting, High-Speed Charting 开源,封装成类,能方便扩展继承。评定结果通过柱状图形式显示,历史记录使用折线图显示,图 5 为 ROM 评定结果显示图。

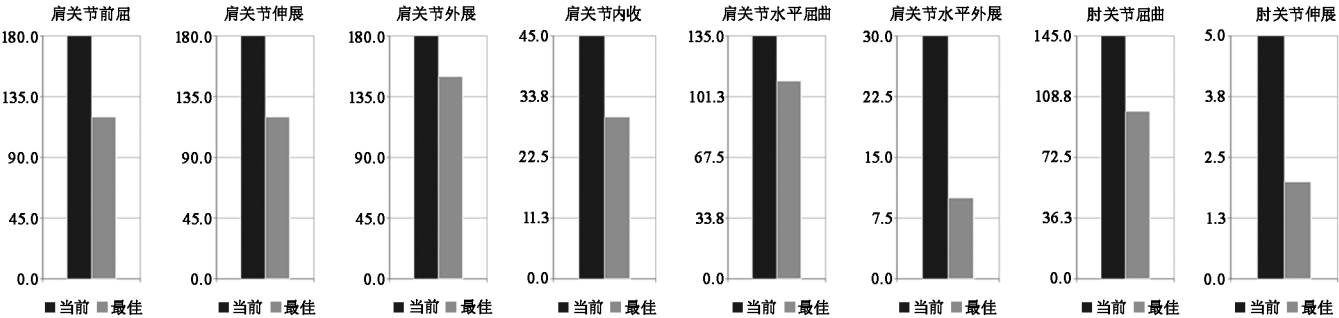


图 5 ROM 评定结果显示图

表 4 游戏任务内容简介

游戏名称	运动模式	训练类型	训练游戏简介
数字计算	一维水平面	ROM、认知	为黑板上的算式选择正确的答案
空中小鸟	一维矢状面	ROM	控制小鸟上下运动,避开炸弹
清洁玻璃	二维复合	ROM、ADL	拖把抹布清除玻璃上的污渍
躲避炸弹	二维复合	ROM、认知	躲避上升途中出现的炸弹
厨具记忆	二维复合	ROM、认知、ADL	按照记忆挑选正确厨具
放飞气球	三维复合	ROM、认知、ADL	控制人物沿路前进并放飞沿途气球

功能测试

本课题选用上海理工大学自主研发的一款多自由度中央驱动式上肢康复机器人作为实验样机,该机器人拥有独立的机械传动系统和底层电气控制系统,可实现被动、助力、主动 3 种康复训练模式,能实时检测患者患肢肌力及关节运动范围,辅助患者完成肩关节屈曲/伸展、肩关节外展/内收、肘关节屈曲/伸展、前臂旋前/旋后、腕部桡偏/尺偏、腕部旋前/旋后共 6 个机械自由度康复训练。

在进行康复训练时,系统会确认患者是否进行过康复评定(评定内容包括主动肌力、关节活动度及认知功能评定等),首次使用该设备的患者需先进行康复评定后方可开展后续康复训练,已评定过的患者可按需求选择康复评定、康复训练或查看康复报告等功能。本系统根据患者肌力及关节活动度综合评估结果可提供被动训练、助力训练和主动训练三种训练模式,如图 6,根据 Lovett 分级法评估结果,治疗师为患者选择合适的训练模式。

在被动训练模式下对实验对象分别进行不同类型的训练,包括肩、肘、腕单关节 X 轴运动和 Y 轴运动、多关节圆周运动和喝水运动共 4 种不同难度的训练类型。图 7 显示实验对象正在进行被动圆周运动;在被动训练过程中,设备机械臂带动患者练习匀速运动,且速率较慢,尽量避免二次损伤。助力训练模式和主动训练模式通过虚拟现实游戏训练方式实现,如选择“放飞气球”游戏训练(图 8),设置好游戏训练时长及难度等级后开始游戏训练程序,游戏场景中的人物角色由程序控制沿着小路向前,每当遇到气球时由用户带动机械臂运动来控制人物

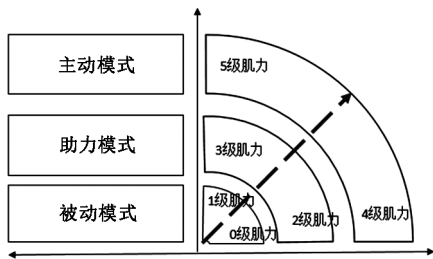


图 6 康复训练模式与肌力等级参考关系

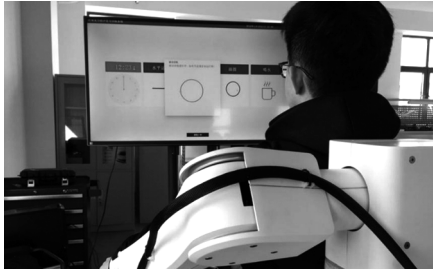


图 7 被动圆周训练示意图



图 8 虚拟现实游戏训练

角色上肢运动,并将气球释放,每释放一处气球则加 1 分。在训练过程中游戏场景未出现角色失控或界面卡顿等现象,证明了虚拟现实游戏训练配合上肢康复机器人训练的可行性,可辅助患者进行康复治疗,提高其在康复过程中的主动参与性。

在游戏训练过程中,游戏场景坐标范围可根据不同用户关节活动评估结果而自动调节,该自适应性给予使用者良好的视觉反馈;随着训练时间和游戏得分增加,游戏训练难度会相应增大,主要表现为游戏背景变复杂、障碍物变多和速度加快,逐渐加强对患者上肢关节活动范围的训练。经初步验证,本系统具有良好的图形用户界面,患者只需通过简单的提示即可根据界面显示流程操作本系统,完成康复评估及训练等功能,康复治疗师使用该系统时也无需经过专业培训。同时本系统将管理权限赋予康复治疗师,能对患者基本信息进行全面管理,支持评估及康复结果录入、浏览、删除等功能,治疗师可参考评估结果,为存在认知障碍患者选择带有认知训练场景的游戏,为肌力较弱患者设置被动训练模式等。

结语

本课题为上肢康复机器人设计了一套人机交互软件系统,可实现用户管理、康复评定、虚拟训练和自动生成康复报告等功能,实时监测、记录治疗参数及患者关节活动度变化,且训练过程具有趣味性,能增加患者治疗积极性及自信心。本系统实现多方位功能评定与多元素康复训练相结合,功能评定和康复训练结果的量化能方便观察比较,不仅能减轻康复医师繁重体力劳动,提高康复治疗师工作效率,也为患者提供了一个更有趣、更高效的康复治疗模式。

参考文献

- [1] 黄真.“运动学习”相关理论及其在脑性瘫痪康复中的应用[J].中国康复医学杂志,2007,22(7):652-655.
- [2] Connell LA, McMahon NE, Redfern J, et al. Development of a behaviour change intervention to increase upper limb exercise in stroke rehabilitation[J]. Implement Sci, 2015, 10(1): 1-9. DOI: 10.1186/s13012-015-0223-3.
- [3] 韩晓晓,柯将琼,蒋松鹤,等.虚拟现实游戏训练对脑卒中患者偏瘫上肢功能恢复的影响[J].中华物理医学与康复杂志,2016,38(6):401. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2016.06.001.
- [4] Cho S, Ku J, Cho YK, et al. Development of virtual reality proprioceptive rehabilitation system for stroke patients[J]. Comput Methods Programs Biomed, 2014, 113(1): 258-265. DOI: 10.1016/j.cmpb.2013.09.006.
- [5] Maciejasz P, Eschweiler J, Gerlach-Hahn K, et al. A survey on robotic devices for upper limb rehabilitation[J]. J Neuroeng Rehabil, 2014, 11(1): 3. DOI: 10.1186/1743-0003-11-3.
- [6] Hinz S. MySQL 5.0 Certification Study Guide [M]. Lexington: Sams Publishing, 2005: 121-125.
- [7] 史运涛,孙德辉,李志军,等.基于 Modbus 协议的通讯集成技术研究[J].化工自动化及仪表,2010,37(4): 67-72. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3932.2010.04.019.
- [8] 温洪波,张振馨,牛富生,等.北京地区蒙特利尔认知量表的应用研究[J].中华内科杂志,2008,47(1): 36-39. DOI: 10.3321/j.issn: 0578-1426.2008.01.012.
- [9] 任传成.健康物联网[M].上海:上海科学技术文献出版社,2010: 305-310.
- [10] 王宏图.虚拟现实技术在脑卒中运动康复中的应用现状[J].中国康复理论与实践,2014,20(10): 911-915. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9771.2014.10.004.
- [11] 徐丽丽,吴毅.虚拟现实技术在脑卒中患者手功能康复中的应用[J].中华物理医学与康复杂志,2007,29(2): 136-138. DOI: 10.3760/j.issn: 0254-1424.2007.02.020.

(修回日期:2019-03-02)

(本文编辑:易 浩)