

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.05.002

基于感知反馈的手部康复交互系统研究

李洋¹, 陈恩伟¹, 武迪¹, 穆景颂², 曹大迪¹, 王勇¹

(1. 合肥工业大学 机械工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 中国科学技术大学附属第一医院(安徽省立医院) 康复医学科, 安徽 合肥 230001)

摘要:为提高手部功能康复设备的多功能性、康复方案与交互方式的多样性,增加康复训练的趣味性,文章设计一款基于感知反馈的手部康复交互系统。该系统包含基于康复训练装置和信号采集、数据处理、感知反馈等模块设计的 3 款康复游戏(“飞翔的小鸟”和“乒乓球”游戏用于训练手指的屈伸能力,“贪吃蛇”游戏用于训练手部的协调能力),并具有基于表面肌电信号和基于图像手势识别的 2 种主动交互式训练方案。样机实验测试结果证明,康复系统具有良好的稳定性,感知反馈可以有效增强手部康复系统的交互能力,提升患者的康复效果。文章研究结果可为手部康复治疗提供一种有效的康复训练交互过程。

关键词:多模态感知反馈;交互系统;表面肌电信号;手部康复;游戏化

中图分类号:TP274.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2025)05-0583-08

A hand rehabilitation interactive system based on perceptual feedback

LI Yang¹, CHEN Enwei¹, WU Di¹, MU Jingsong², CAO Dadi¹, WANG Yong¹

(1. School of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Department of Rehabilitation Medicine, The First Affiliated Hospital of University of Science and Technology of China(Anhui Provincial Hospital), Hefei 230001, China)

Abstract: In order to improve the multifunctionality of hand rehabilitation equipment and the diversity of rehabilitation programs and interaction methods, and to increase the fun of rehabilitation training, this paper designs a hand rehabilitation interactive system based on perceptual feedback. Based on the rehabilitation training device and signal acquisition, data processing and perceptual feedback modules, the system designs three rehabilitation games, namely Flying Bird and Table Tennis for training finger flexion and extension, and Gluttony Snake for training hand coordination. The active interactive training based on surface electromyographic signals and the active interactive training based on image gesture recognition are also proposed. The results of prototype experimental test show that the rehabilitation system has good stability, and the perceptual feedback can effectively enhance the interactive ability of the hand rehabilitation system and improve the rehabilitation effect of the patients. The results of the study can provide an effective interactive process of rehabilitation training for hand rehabilitation therapy.

Key words: multimodal perceptual feedback; interactive system; surface electromyographic signals; hand rehabilitation; gamification

收稿日期:2023-08-30;修回日期:2023-10-30

基金项目:国家自然科学基金联合基金资助项目(JZ2018GJLH0078)

作者简介:李洋(2000—),男,四川南充人,合肥工业大学硕士生;

陈恩伟(1979—),男,广西合浦人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师;

王勇(1969—),男,安徽合肥人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师,通信作者, E-mail: simenkouwang@sina.com.

0 引言

手是人体最灵活的器官之一,在日常生活中起着重要的作用^[1]。大脑皮层运动中枢约有 1/4 的神经用于管理手部运动^[2-3],因此脑部的损伤极易导致手部功能障碍,而脑卒中患者中极为常见的一种并发症是偏瘫,其症状就包含了手部功能障碍^[4]。

康复训练有助于脑卒中患者的运动中枢神经恢复,但这是一个漫长且枯燥的过程。因此,丰富康复设备功能、增加人与设备的交互能力、提升患者的康复体验是一个必然趋势。

对于手部功能康复训练问题,国内外学者展开了深入研究。文献[5]通过有限元仿真优化鱼骨结构的具体参数,开发了一种基于鱼骨结构的新型手部康复软体机器人;文献[6]设计了便捷式手部康复系统,通过握力圈、采集设备和 3 款游戏对患者的握力变化进行记录并判定其康复情况;文献[7]研发了一款名为 Music Glove 的手部康复系统,通过对捏不同手指产生不同音符,提升患者的训练体验。

结合国内外关于手部康复训练交互系统的研究不难发现,手部康复机器人仍存在以下问题:

1) 不论是刚体式还是软体式,手部康复机器人的研究大多集中在装置结构的设计优化和康复功能的实现上,忽略了患者身心健康。

2) 多数手部康复训练装置只能在康复后期使用,且交互形式单一,用户体验不足,训练方案缺乏针对性。

针对以上问题,本文对手部康复交互系统进行研究,在手部康复理论的基础上,结合患者所处的不同康复阶段,以游戏化训练过程为主旨,采用多模态感知反馈(以视觉反馈为主,辅以电刺激反馈、震动触觉反馈和听觉反馈),设计基于表面肌电信号和基于图像手势识别的 2 种主动交互式训练方案,以增强系统的交互能力,提高患者的训练积极性。

1 交互系统设计

1.1 信号采集及数据处理

本文系统涉及到信号采集、数据处理、游戏设计优化和感知反馈模块等。

患者在进行康复训练时,系统首先使用肌电信号传感器、摄像头采集患者手部的肌电信号和手势视频信号;然后对肌电信号进行特征提取,对

手势视频通过图像识别测算出 5 个手指的弯曲角度,并对这 2 种数据结果进行数据格式化转换成统一格式;接着将格式化后的数据传输到游戏中,控制游戏角色的运动方式;最后系统根据游戏进度,在适当的时机通过多模态感知反馈将有效信息反馈给用户,用户根据信息做出决策,再调整表面肌电信号或者手势。康复系统整体架构如图 1 所示。

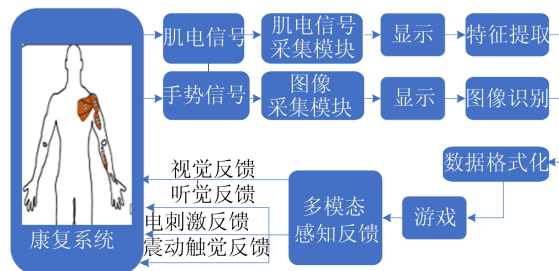


图 1 康复系统架构图

本文的肌电信号采集模块使用 stm32 的 ADC 外接非侵入式肌电信号传感器,使用 3 个采集通道,3 个传感器分别位于指浅屈肌、指伸肌和拇长伸肌正上方的皮肤表面,肌肉位置如图 2 所示。

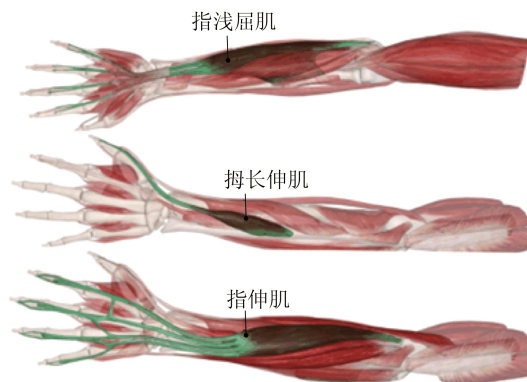


图 2 采集肌电信号的肌肉位置

考虑到患者患侧的肘关节和肩关节可能无法主动屈曲,手势信号的采集选用支架支撑外接摄像头自上向下拍摄,患者只需将手部放在桌面上即可。

1.2 交互系统界面设计

为了方便地考虑患者康复训练时的体验,本文系统将训练所需要的设置、信息以及动画整合到一个界面上,交互系统的界面及其区域划分如图 3 所示。

图 3 中:区域 1 为控件区域,放置各个功能控

件选项,用于选择不同的训练模式和感知反馈模式;区域 2 为显示区域,用于实时显示表面肌电曲线图或手势视频;区域 3 为游戏区域,游戏画面和交互在此区域内完成。



图 3 系统界面及其区域划分

1.3 交互游戏设计与优化

本文系统共包含 3 个交互游戏,分别是“飞翔的小鸟”“乒乓球”和“贪吃蛇”。由于该康复系统使用者是恢复水平处于不同阶段的脑卒中患者,且以老年人为主,他们的反应速度大多较慢,因此需要针对患者进行定制优化,前 2 款游戏主要是训练患者的手指关节弯曲能力,第 3 款则是将手部训练和手臂运动训练相结合,更加注重腕关节和肘关节的协调训练。

1.3.1 “飞翔的小鸟”游戏

该游戏传统规则是用户控制小鸟上下飞翔,躲避画面中的障碍物,撞到障碍物则游戏结束。为了适应患者的身体条件,对游戏进行升级优化,改为回合制得分,将小鸟下落的加速度减小、障碍物的移动速度降低以及障碍物之间的空隙增大,并将按键控制小鸟飞翔躲避障碍物改为由表面肌电信号控制或手指弯曲角度控制。每个回合持续 2 min,成功躲避得 1 分,碰到障碍物不得分,游戏继续,2 min 后结束并给出得分。

使用表面肌电信号控制时,患者仅需整体抓握手部,使表面肌电信号的幅值超过设定阈值,即可实现对游戏角色的控制。使用手指弯曲角度控制时,只需控制手指弯曲超过设定角度,即可进行游戏操作。

游戏运行时,小鸟会一直匀速前飞,在无外界输入时加速下落,直至掉落在地面,用户可以通过手部抓握运动控制小鸟向上飞,当手指弯曲角度或表面肌电信号超过阈值时,小鸟则上飞一段距离。“飞翔的小鸟”游戏实际运行时的画面如图 4

所示。

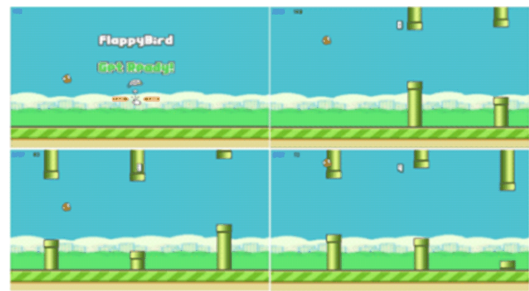


图 4 “飞翔的小鸟”游戏运行图

1.3.2 “乒乓球”游戏

传统的“乒乓球”游戏是一种 PK 制游戏,乒乓球在 2 个挡板间来回移动,未接到球的一方输掉游戏,比赛结束。考虑到患者条件,将该游戏改为回合制得分,使用手指弯曲角度控制和表面肌电信号控制取代键盘按键控制。每轮游戏持续 2 min,期间获胜方得 1 分,失败方不得分;接着重新发球继续游戏,与此同时大大降低球的移动速度,加长挡板,给患者充分的反应时间。

游戏运行后,用户手指的弯曲角度或者表面肌电信号的幅值经过数据处理模块后会被映射到 [2 000, 3 000] 范围中,再由下式将 [2 000, 3 000] 中的数值映射到游戏窗口的范围内,代入参数后公式如下:

$$y = \frac{h(x - 2000)}{1000} \quad (1)$$

其中: x 为输入; h 为游戏窗口的高度,用像素值表示。

经过式(1)计算出的值就是用户挡板在游戏窗口中的 y 坐标,对于不同的弯曲角度和信号幅值,用户挡板都会有一个位置与之对应,用户可以通过手指弯曲角度或者表面肌电信号精准地控制挡板位置,从而接住乒乓球。

为了丰富该游戏的内容,添加了 3 种游戏模式,即练习模式、人机对战模式和双人对战模式。“乒乓球”游戏实际运行时的画面如图 5 所示。

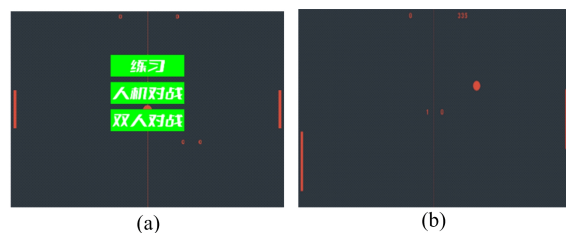


图 5 “乒乓球”康复交互游戏运行图

1.3.3 “贪吃蛇”游戏

为改善患者手臂与手掌协调能力以及手腕灵活度,该游戏通过用户整条手臂的协调运动带动指尖移动,控制贪吃蛇移动去捕获屏幕中的食物,每吃下 1 个食物得 1 分,贪吃蛇身体长度增加 1 段,1 min 后游戏结束,给出游戏得分。与传统的该类游戏不同的是,蛇头部碰触身体部分并不会结束游戏,以此降低难度。“贪吃蛇”游戏实际操作效果如图 6 所示。



图 6 “贪吃蛇”游戏实际操作效果图

1.4 感知反馈设计

本文系统的多模态感知反馈是以视觉反馈为基础,辅以听觉反馈、震动触觉反馈和电刺激反馈,以此增强系统的交互能力。视觉反馈通过游戏画面传达给用户;听觉反馈通过电脑语音播报形式实现,在打开听觉反馈的前提下,系统会根据游戏进度在不播报、抓握和伸展之中选择一个播报,提示患者做出正确动作;震动反馈使用线性谐振器,由单片机控制触发;电刺激反馈装置使用可编程双通道神经电刺激传感器,主要硬件包括 1 个电刺激发生器和 2 对独立电极。

线性谐振器和电刺激传感器在手臂的内、外两侧均有布置,外侧传感器用于提示和辅助用户伸展手部,内测传感器用于提示和辅助用户进行抓握动作。2 种传感器的安装位置如图 7 所示。

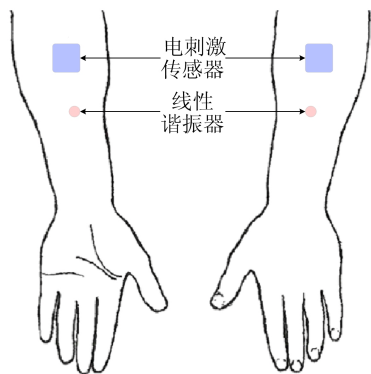


图 7 传感器安装位置示意图

本文电刺激反馈各项参数依据文献[8]、文献[9]等研究成果进行设定,具体见表 1 所列。

表 1 电刺激参数的设置

参数	设置内容
刺激方式	恒压
波形	双向脉冲波
频率/Hz	4
幅值/V	30
脉宽/ μs	200

在患者进行交互式康复训练时,首先对患者的反应能力进行简单测试。系统给出“抓握”命令手势,记录此刻的系统时间 t_{s1} ;同时对患者进行听觉、震动触觉和电刺激反馈,直至患者完成抓握动作(手指弯曲角度超过 270° 或者肌电信号幅值回归正常水平),记录此刻的系统时间 t_{e1} ;两者相减得出患者本次的反应时间 Δt_1 ;循环 10 次后对所有 Δt_1 取均值,得出患者最终反应时间 ΔT_s 。计算公式如下:

$$\Delta T_s = \frac{\sum_{i=1}^{10} (\Delta t_{ei} - \Delta t_{si})}{10} \quad (2)$$

在游戏交互中,当需要患者进行抓握运动时,提前 ΔT_s 时间对患者进行反馈刺激。但是在实际使用过程中,由于游戏运行规则的原因,1 次抓握动作无法将游戏角色移动到目标位置,需要 2 次或 3 次的抓握动作才能到达目标位置。因此最终的时间提前量 ΔT 为:

$$\Delta T = \lambda \Delta T_s \quad (3)$$

其中: ΔT 表示反馈刺激的时间提前量; λ 为系数,此处取 2。

2 康复训练方式设计

2.1 手部功能康复医学理论

康复医学是指通过康复治疗改善和提高患者因疾病或者受伤而受损的肢体功能,维持和防止肢体功能进一步下降,减少肢体功能障碍,最大限度地提高残障人士的独立性和生活质量。

现代康复理论和临床实践证明^[10],康复训练可以有效帮助脑卒中患者改善患肢的运动能力,缩短患者的康复周期,提高生活质量。从医学角度来说,康复训练有助于脑卒中患者的运动中枢神经恢复,加强对肢体运动的控制能力。合理的康复训练可以帮助手部功能障碍患者预防肌肉萎缩,加快手部运动功能恢复。

不同康复周期患者的病症特点和所采取的康

复措施特点差异较大,因此,需要制定分阶段、有针对性的康复训练方案,以满足患者的特定康复需求。处于运动分离期的患者虽然无法做出较完整的手势运动,但是在其自主的屈曲和小范围伸展中能够产生明显的表面肌电信号。本文提供的训练方案就是基于表面肌电信号的主动交互式训练。处于运动精细期患者的康复训练目标是提高手指控制的精细程度,表面肌电信号可以识别不同手势,但在捕捉手部精细化运动方面存在一定的不足。为此,本文提出基于图像手势识别的主动交互式训练方案。

2.2 基于表面肌电信号的主动交互式训练

处于运动分离期^[11]的患者可以主动控制手部进行小范围伸展,因此应帮助患者提高对手部肌肉的控制。本文系统基于表面肌电信号帮助患者进行主动交互式训练。以抓握形式进行训练时,病人的患肢手臂处佩戴肌电信号传感器和感知反馈装置,使用表面肌电传感器捕获患者抓握时产生的表面肌电信号进行游戏交互训练,在感知反馈的辅助下尽量得分。得分情况可以在一定程度上反映患者的康复进度。特别是在有“震动刺激”感知反馈时,需将线性谐振器和肌电采集贴片位置间隔一定距离,以避免“震动刺激”感知反馈对肌电信号波形的采集产生影响。

脑卒中患者在进行抓握运动时所产生的表面肌电信号与健康个体相比呈现显著差异。此外,在不同康复水平下,脑卒中患者进行相同的抓握运动时,表面肌电信号也呈现出差异性。

为提高交互系统的鲁棒性,患者在进行交互式训练前需使用患肢进行 10 次抓握运动,采集患肢产生的表面肌电信号并进行特征提取,以确定

患者表面肌电信号的特征。提取的表面肌电信号特征主要有均方根值 f_{RMS} 、上轮廓线及上轮廓线的最值 E_{max} , f_{RMS} 和 E_{max} 均为 10 个该信号特征的均值,分别作为“飞翔的小鸟”和“乒乓球”交互游戏控制的核心参数,使交互式训练游戏可以更好地适应不同用户。

传感器采集的表面肌电信号包含噪声成分,不适于直接使用,为提高信号质量,需要进行特征提取以滤除冗余和干扰信息。对表面肌电信号处理可以分为时域、频域和时频域 3 个方面:时域分析基于时间序列进行,具有计算简便和实时性优势;频域分析在频率范围内描述信号的能量分布;时频分析综合了时域和频域分析,如小波变换算法等。

本文对数据处理的实时性有较高要求,为此,选用时域分析中的均方根 (root mean square, RMS) 算法进行处理,计算公式如下:

$$f_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (4)$$

其中: N 为样本个数; x_i 为样本内第 i 个信号量。

此外,为实现游戏角色的运动控制,需要利用表面肌电信号的幅值信息,且对实时性要求较高,故选用表面肌电信号的上轮廓线。提取上轮廓线时,首先需进行滑动窗口的最值计算。例如,当窗口大小为 7 时,则选取 7 个数据中的最大值,再对连续 30 个最值取平均数。该步骤将连续输入的肌电信号数据转化为一条相对平滑的外轮廓曲线,完成对游戏角色上下移动的控制,从而获得游戏分数。

以“飞翔的小鸟”和“乒乓球”交互游戏为例,训练过程分别从手部视角(画面上方)和交互系统操作界面视角进行了展示,如图 8 所示。

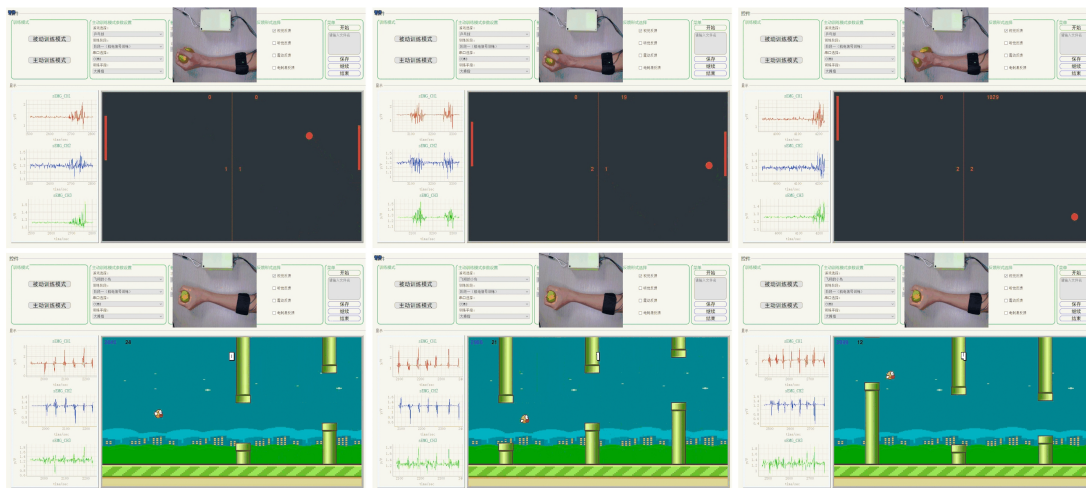


图 8 基于表面肌电信号的主动交互式训练过程

结果表明:2款康复游戏均顺利完成训练,且肌电信号曲线显示功能也正常。经过此轮测试实验可以确认,肌电信号采集模块、数据处理模块、游戏模块和表面肌电信号曲线显示模块等均满足设计要求,能够实现基于表面肌电信号的主动交互式康复训练方案。

2.3 基于图像手势识别的主动交互式训练

基于手势识别的主动交互式康复训练是指患者通过主动手势变换控制游戏角色移动,从而进行人机交互的一种康复方案,适用于运动精细期患者,该阶段的患者痉挛现象逐渐消失,手部可以进行多种运动形式,但运动的精细度不足。因此基于手势识别的主动交互式训练的目标就是提高患者对手指控制的精细度。

本文使用开源框架 MediaPipe 进行手势信号的识别和提取。MediaPipe Hand 是一种高保真手部和手指跟踪解决方案,但从中获取的 21 个三维坐标无法直接用于游戏角色控制。本文采用手指弯曲角度值实现对游戏的控制,因此需要从坐标点得到各手指弯曲角度值。这些角度值由对应手指的指尖关键点(TIPP)、掌骨关节关键点(MCPP)、0号关键点(WRIST)的 y 坐标和 z 坐标计算得出,公式如下:

$$\theta = \left| \arctan \frac{y_{TIPP} - y_{MCPP}}{z_{TIPP} - z_{MCPP}} - \arctan \frac{y_{WRIST} - y_{MCPP}}{z_{WRIST} - z_{MCPP}} \right| \quad (5)$$

经上述处理后得到的角度范围为 $[0^\circ, 180^\circ]$,肌电信号采集的数据范围为 $[0, E_{\max}]$, $E_{\max} \leq 5$,

2个数据不属于同一量级,无法同时用于游戏控制。因此,需要对数据进行格式化处理,从而方便统一管理和数据传输。采用等比例放大的方式,分别将 $[0^\circ, 180^\circ]$ 和 $[0, E_{\max}]$ 放大到 $[2\ 000, 3\ 000]$ 范围,公式如下:

$$y = x_{out_min} + \frac{(x - x_{in_min})(x_{out_max} - x_{out_min})}{x_{in_max} - x_{in_min}} \quad (6)$$

其中: x 为输入; y 为输出; x_{in_min} 为输入范围的最小值; x_{in_max} 为输入范围的最大值; x_{out_min} 为输出范围的最小值; x_{out_max} 为输出范围的最大值。

对于弯曲角度的转换,将 $x_{in_min} = 0^\circ$, $x_{in_max} = 180^\circ$, $x_{out_min} = 2\ 000$, $x_{out_max} = 3\ 000$ 代入式(6),即可得到:

$$y = 5.56x + 2\ 000 \quad (7)$$

对于表面肌电信号的转换,将 $x_{in_min} = 0$, $x_{in_max} = E_{\max}$, $x_{out_min} = 2\ 000$, $x_{out_max} = 3\ 000$ 代入式(7),可得:

$$y = \frac{1\ 000x}{E_{\max}} + 2\ 000 \quad (8)$$

使用式(7)和式(8)即可将2种数据放大到 $[2\ 000, 3\ 000]$ 范围中。

通过图像识别获取到的手部关键点三维坐标计算出手指弯曲角度和移动距离,用于控制游戏中的角色运动,通过特定的运动来获取游戏分数。要求患者在适当的时机手指弯曲一定的角度或移动一定的距离。依据此康复方案进行训练,患者可以在康复游戏交互过程中不知不觉地提升对手指的控制精度。训练过程如图9所示。

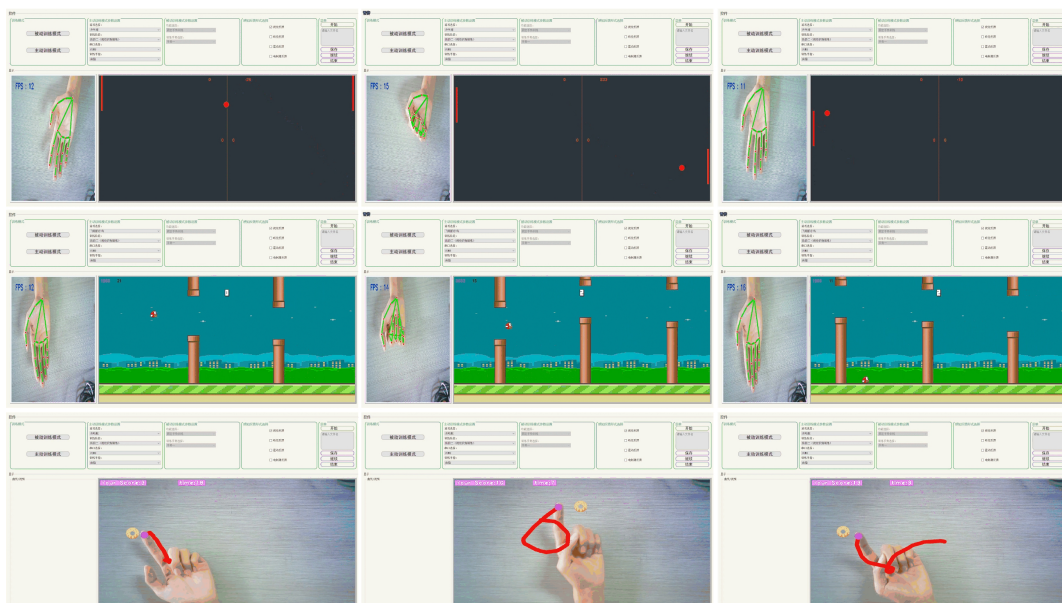


图9 基于图像手势识别的主动交互式训练过程

结果表明,3 款游戏均正常完成测试,图像识别和视频显示等模块均正常运作,系统能够实现基于手势识别的主动交互式康复训练方案。

3 实验结果与分析

在某医院康复医学科进行临床实验,以验证本文手部康复系统能否用于患者康复训练,并努力寻找出一种较为科学的反馈方案。

进行感知反馈临床探究实验时,考虑患者人身安全问题,医院禁止对患者使用电刺激反馈,因此本次临床实验主要探究听觉反馈和震动触觉反馈对游戏交互的影响。

对 8 名处在运动精细期的偏瘫患者进行临床探究实验,患者基本信息见表 2 所列。为控制变量,康复训练方案统一选择为基于手势识别的主动交互式训练,交互游戏选择“飞翔的小鸟”。

表 2 感知反馈实验患者基本信息

编号	性别	年龄	分期
1	男	50	运动精细期
2	男	65	运动精细期
3	男	55	运动精细期
4	男	75	运动精细期
5	女	69	运动精细期
6	女	76	运动精细期
7	男	66	运动精细期
8	女	13	运动精细期

每位患者进行 4 组实验,分别为:① 无反馈辅助;② 听觉反馈辅助;③ 震动反馈辅助;④ 听觉+震动反馈辅助。每组实验重复 2 次,记录 2 次游戏得分,每组游戏的最终得分取 2 次成绩平均值。实验过程如图 10 所示,实验结果如图 11 所示。



图 10 感知反馈临床探究实验过程

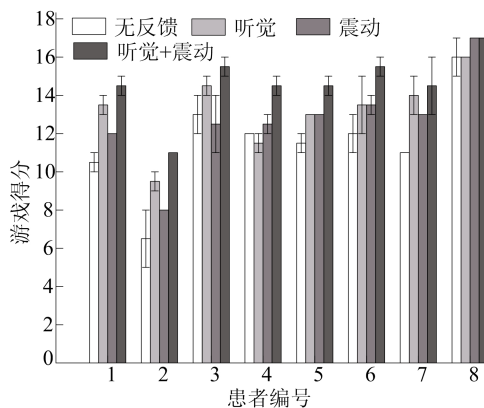


图 11 感知反馈临床实验结果

由图 11 可知,不同患者间由于康复水平的不同,其游戏得分会存有差距。对每位患者而言,有反馈辅助时的游戏得分普遍高于无反馈,因此听觉反馈和震动反馈确实有助于提高患者的游戏表现。在 2 种反馈单独进行时,8 名患者中有 4 名患者的听觉反馈得分高于震动反馈,有 2 名患者 2 种反馈成绩持平,剩余 2 名患者则是震动反馈得分高于听觉反馈,因此对于脑卒中患者来说,单独听觉反馈的提升效果要优于震动反馈。而对于震动触觉,大脑还需将其转换成有用信息后才能做出决策,这对反应迅速的正常人影响可以忽略不计,但是患者以老年人为主,反应速度较为缓慢,最终导致游戏表现得分稍低。此外在实验过程中发现,听觉反馈容易被环境中的其他声音干扰,当环境中存在噪声时,患者的注意力容易分散。从图 11 不难发现,听觉+震动同时反馈的提升效果要优于两者单独反馈。

综上所述,在不使用电刺激的前提下较为合理的反馈方案是:当环境安静时,使用听觉反馈即可;当环境嘈杂时,可以使用听觉+震动的反馈形式。

由于医院不允许将电刺激用于临床实验,为了探究电刺激对训练成绩的影响,把 9 个正常人作为受试者进行对照实验,实验条件、步骤和方法与临床实验相同,只是在听觉和震动反馈的基础上加入电刺激反馈。共进行 6 组实验:① 无反馈辅助;② 听觉反馈辅助;③ 震动反馈辅助;④ 电刺激反馈辅助;⑤ 听觉+震动反馈辅助;⑥ 听觉+电刺激反馈辅助。由于震动和电刺激同属触觉类,且刺激位置相近,经实测,电刺激产生的感觉与震动触觉会相互干涉,因此未将震动反馈和电刺激反馈进行组合测试。健康人感知反馈实验结果如图 12 所示。

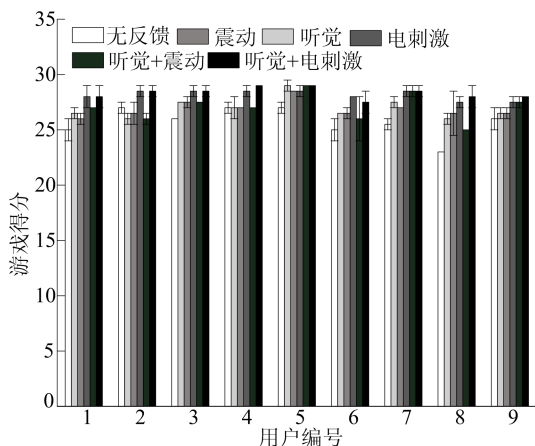


图 12 健康人感知反馈实验结果

从图 12 实验结果来看,正常人的得分要普遍高于脑卒中患者,不同用户之间得分相差较小。对每个用户而言,9 位受试者中有 7 位受试者的有感知反馈游戏得分均高于无感知反馈,这也说明了无论是对脑卒中患者还是正常人,感知反馈可以增强系统交互能力,提高用户的训练表现。不同于脑卒中患者的是,9 名受试者中有 7 名受试者的震动反馈得分高于听觉反馈得分。在听觉、震动和电刺激 3 种反馈类型中,有 8 名受试者的电刺激反馈得分高于其他 2 种反馈,听觉+电刺激反馈也是类似。由此可以得出,对于健康人而言,电刺激反馈效果要优于听觉反馈和震动触觉反馈。

4 结 论

本文设计了基于感知反馈的康复交互系统,并根据不同时期患者病症表现和康复特点设计出基于表面肌电信号和基于图像手势识别的 2 种主动交互式训练方案。训练结果表明,本文系统在康复手套上的测试均能满足手部康复训练交互的需求,游戏化的训练方式能够激励并帮助脑卒中患者实现积极主动的康复训练。最后通过感知反馈探究实验探索听觉、震动和电刺激反馈对主动交互式训练的影响,实验结果表明:感知反馈可以帮助患者提高游戏得分;在脑卒中患者中,听觉反馈对患者训练成绩的提升高于震动反馈;而在正

常人中,电刺激反馈的提升效果要高于震动反馈和听觉反馈。

后续工作还需与医院进一步合作,继续完善该手部康复交互系统的康复训练方案和康复效果。

[参 考 文 献]

- [1] 陈楠,刘正士,杨岩江,等.一种单电机驱动外骨骼康复机械手的机构设计与运动分析[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2019,42(11):1446-1454.
- [2] LUNDBORG G,ROSEN B. Hand function after nerve repair[J]. Acta Physiologica,2007,189(2):207-217.
- [3] 杨岩江.手功能康复外骨骼的机构设计与分析[D].合肥:合肥工业大学,2018.
- [4] 危娟,万婷,李巧薇,等.脑卒中病人社会参与感受现状及其影响因素[J].护理研究,2023,37(2):321-326.
- [5] JIANG Y K,CHEN D S,LIU P Y, et al. Fishbone-inspired soft robotic glove for hand rehabilitation with multi-degrees-of-freedom[C]//2018 IEEE International Conference on Soft Robotics. [S. l.]:IEEE,2018:394-399.
- [6] 张金龙.基于虚拟现实技术的手指康复系统研究[D].武汉:华中科技大学,2012.
- [7] ZONDERVAN D K, FRIEDMAN N, CHANG E, et al. Home-based hand rehabilitation after chronic stroke: randomized, controlled single-blind trial comparing the Music-Glove with a conventional exercise program[J]. Journal of Rehabilitation Research and Development, 2016, 53(4): 457-472.
- [8] 张佳峰.基于步态分析的足下垂功能性电刺激研究[D].合肥:合肥工业大学,2021.
- [9] 陈瑶,王鹤玮,项育枝,等.低频经皮穴位电刺激在社区脑卒中上肢手功能康复中的近期疗效分析[J].中国康复,2019,34(12):669-672.
- [10] 胡鑫,王振平,王金超,等.脑卒中上肢康复训练机器人的研究进展与展望[J].中国康复理论与实践,2014,20(10):901-904.
- [11] BRUNNSTROM S. Center of gravity line in relation to ankle joint in erect standing: application to posture training and to artificial legs[J]. Physical Therapy, 1954, 34(3): 109-115.

(责任编辑 胡亚敏)