

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.07.001

# 基于足底力与姿态信息的平衡能力训练交互系统研究

刘志义, 张彦, 王勇

(合肥工业大学 机械工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:**针对当前平衡能力训练交互系统的不足,文章制定了一套平衡能力训练策略和人机交互策略,在此基础上开发了一套基于足底力与姿态信息的平衡能力训练交互系统。基于足底力信息和人体大腿部姿态信息设计 3 种不同的虚拟训练游戏,该虚拟游戏设有曲线图实时显示传感器数据并具有背景音乐、语音引导、语音纠错等功能。样机实验测试结果表明,文章设计开发的交互系统可提升人体的静态和动态平衡能力,且在训练时伴有多种视觉和听觉反馈,保证了人机交互的趣味性和沉浸性,能够为患者平衡能力训练提供正向增益。

**关键词:**足底力;姿态信息;虚拟游戏;平衡能力训练;人机交互

**中图分类号:**TP242.61 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2025)07-0865-07

## Study on interactive system for balance training based on plantar force and posture information

LIU Zhiyi, ZHANG Yan, WANG Yong

(School of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** Aiming at the deficiency of the current interactive system for balance training, this paper formulates a set of balance training strategies and human-computer interaction strategies, and develops an interactive system for balance training based on plantar force and posture information. Three kinds of virtual training games are designed based on the information of plantar force and human leg posture. The virtual games implement real-time graphical display of sensor data with functions including background music, voice guidance, and voice-based error correction. Through the experimental test of prototype, it is proved that the interactive system can improve the static and dynamic balance ability, and the training is accompanied by a variety of visual and auditory feedback, which ensures the interest and immersion of human-computer interaction, and can provide positive gains for the patients' balance training.

**Key words:** plantar force; posture information; virtual game; balance training; human-computer interaction

## 0 引 言

人体平衡功能在众多生理机能中起着举足轻重的作用,良好的平衡能力是人正常生活的基本条件<sup>[1-3]</sup>。常见病症如小脑病变、前庭系统疾病及肌肉病变等都会导致平衡功能障碍<sup>[4]</sup>。随着老龄

化加剧,脑卒中、颅脑损伤等疾病导致的双下肢功能障碍不仅对患者生活质量的影响日益显著<sup>[5]</sup>,还显著增加跌倒风险。根据中国疾病监测系统数据,跌倒已成为我国 65 岁以上老年人因病致死的首要原因<sup>[6]</sup>。随着科技的发展,虚拟现实技术作为新兴科学技术已经得到广泛应用,在虚拟现实

收稿日期:2023-11-13;修回日期:2023-12-26

基金项目:国家自然科学基金联合基金资助项目(U1713210)

作者简介:刘志义(1995—),男,安徽铜陵人,合肥工业大学硕士生;

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.

中,人的意识与身体处于身心分离的特殊状态,这一特性被引入康复医学领域并逐渐得到医患的广泛认可,使得虚拟现实技术与康复医学相结合成为热门的平衡能力康复治疗手段。

国内外对应用虚拟现实技术的平衡康复训练交互系统展开了广泛研究,并取得了一系列研究成果。文献[7]对老年人开展了基于运动传感器的互动式平衡训练,老年人根据互动屏幕上的训练内容做出相应动作,下肢布置的运动传感器负责姿态数据采集;文献[8]在家庭场景中评估了虚拟现实平衡训练的有效性,受试者通过 VR 技术控制自身重心变化以完成各项游戏任务;文献[9]证明使用 VR 系统后患者的静态和动态平衡能力均得到增强,而常规平衡训练只改善静态平衡能力;文献[10]基于虚拟现实技术制作了平衡能力测评及训练系统,分析人体站立平衡调节机制,选取视觉、本体感觉、前庭觉特征参数来进行平衡评估,同时设计了基于人体重心波动的平衡能力训练方案;文献[11]运用 Kinect 体感技术设计了简易平衡训练场景,训练者通过足底压力分布数据的不同来控制重心位置完成训练任务。

结合国内外关于人体平衡能力训练的研究可以发现,现有平衡能力训练交互系统仍存在以下问题:

1) 已有的平衡训练交互系统往往缺乏针对性的虚拟训练场景或虚拟互动游戏,多采用商业游戏如任天堂体感游戏等进行训练,没有将训练场景或游戏与人体平衡能力静、动态康复原理很好地结合。

2) 已有的平衡能力训练交互系统的训练策略和人机交互策略欠缺,系统互动性仍不强。

3) 已有的平衡能力训练交互系统多采用单一的足底力信息或运动姿态信息进行运动感知,训练示范较少,动作纠正互动欠缺,心理学因素考虑欠佳,对传感器数据的实时可视化反馈欠缺。

针对当前平衡能力训练交互系统的不足,本文制定一套平衡能力训练策略和人机交互策略,开发基于足底力与姿态信息的平衡能力训练装置,设计将虚拟训练游戏与人体平衡能力静、动态康复原理相结合的交互系统,在平衡训练的同时伴有视觉和听觉反馈,保证患者平衡能力的训练。

## 1 平衡能力训练和交互策略设计

在开发平衡能力训练装置和交互软件前,需要明确平衡能力训练策略和人机交互策略,进而

指导装置研制和软件开发。

### 1.1 平衡能力训练策略

平衡能力训练主要分为静态平衡能力训练和动态平衡能力训练,动态平衡能力训练又分为主动性平衡能力训练和反应性平衡能力训练<sup>[12]</sup>,静态平衡能力训练主要以维持一系列固定动作的稳定状态为主。主动性平衡能力训练以患者自主运动维持稳定为主;反应性平衡能力训练以患者自主运动时受到外界扰动为主要训练方式。本文根据平衡能力训练分类制定患者自主发力康复的平衡能力训练策略,可以概括为:

1) 静态平衡能力训练的训练动作由简单到困难依次为双腿站立、单腿站立、高抬腿站立。

2) 主动性平衡能力训练的训练动作为患者主动进行重心位置调整,包括双脚站立下的前倾、后仰、左倾和右倾,进阶动作为单脚站立下的上述 4 个方向动作。

3) 反应性平衡能力训练在上述 4 个方向重心位置调整运动的基础上增加外界扰动,根据上文站立平衡调节机制,设置视觉和听觉扰动进行随机干扰。

### 1.2 交互策略

本文将以虚实结合交互范式为主,多通道人机交互范式和 WIMP 范式<sup>[13]</sup>为辅,进行平衡训练交互系统的人机交互设计,使交互方式更为自然和真实。结合平衡能力训练要求,本文选用人体的足底力信息和下肢姿态信息作为交互控制信号,从而保证交互系统的响应速度和运行稳定性。

患者通常还存在一些心理亚健康状态,因此需要将心理学因素考虑进平衡系统人机交互策略中,依据交互范式,本文主要运用引导想象法、生物反馈放松法以及音乐放松法<sup>[14]</sup>对患者进行放松训练。设计虚拟现实场景辅助患者进行场景想象;将足底力信息和下肢姿态信息以曲线图和场景虚拟对象运动的形式反馈给患者;在训练过程中,选取多首适当的音乐嵌入康复训练交互系统,用于舒缓患者紧张心理。

游戏化康复有利于患者康复,游戏时人处于身心放松状态,消极情绪较少,符合积极心理学理论。本文以严肃游戏和虚拟现实游戏为主进行游戏化康复的交互系统设计。在设计游戏化康复训练任务时,以自然元素为主题,营造轻松氛围;任务难度将由低到高层层递进;训练任务时长将以短时训练为基础,分级锻炼为目标,遵循患者意愿时长为辅助。

基于现有人机交互理论、心理学理念以及游戏化方法制定平衡能力训练的人机交互策略,如图 1 所示。

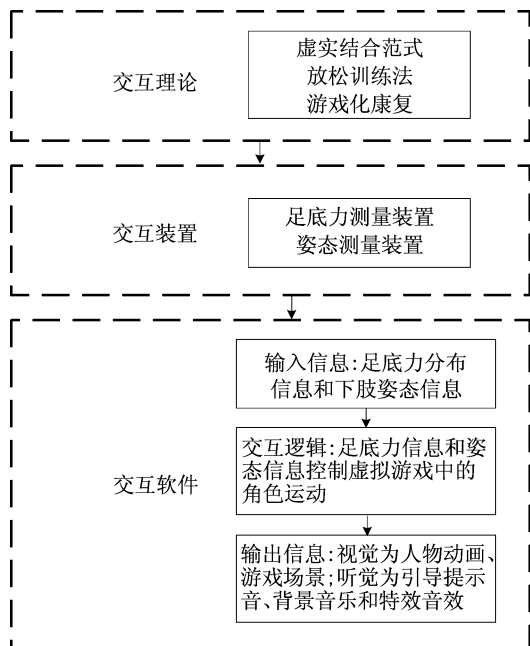


图 1 平衡能力康复训练交互策略框图

## 2 平衡能力训练装置设计

平衡能力训练装置包括足底压力分布测量装置和人体下肢姿态采集装置。

### 2.1 足底压力分布测量装置

足底压力分布测量装置如图 2 所示。

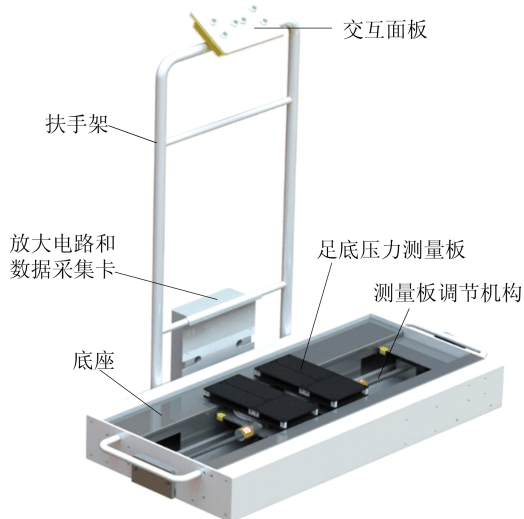


图 2 足底压力分布测量装置

足底压力测量板如图 3 所示,单个面板与底

板中间布置 12 个压力传感器,每个面板设置 3 个分区<sup>[15]</sup>,每个分区布置 4 个压力传感器。训练时,患者左、右脚分别站在单个测量板上,其输出的相应电压信号经过放大和采集后通过 USB 传输至计算机端的交互软件,用作交互软件的控制信号。

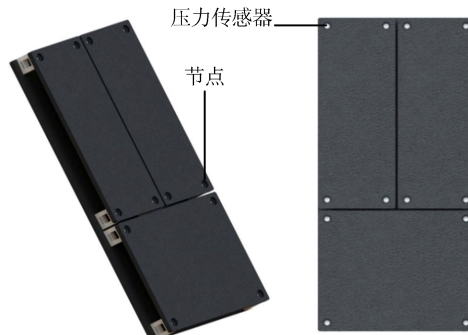


图 3 足底压力分布测量装置

### 2.2 人体下肢姿态采集装置

人体下肢姿态采集装置为由惯性测量单元和数据传输模块组成的姿态传感器。姿态传感器负责采集人体大腿的角度及其变化,采集到的数据通过 RS485 转 TTL 电路发送至蓝牙主机端,信号接收端将蓝牙主机端的 TTL 信号接收,并经过 USB 转 TTL 串口电路,通过串口方式将数据实时发送至计算机端的交互软件,作为交互软件的控制信号。数据传输流程如图 4 所示。

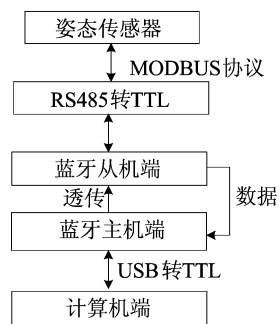


图 4 数据传输流程

## 3 平衡训练交互软件设计

### 3.1 交互软件总体设计

根据上文制定的平衡能力训练和交互策略,针对静态平衡能力训练和动态平衡能力训练进行交互软件设计。交互软件系统框图如图 5 所示。

系统主要工作原理为:传感器采集交互控制信号,发送至交互场景与游戏进入软件逻辑,最后输出可视化界面和交互训练结果。交互控制信号

包括下肢姿态角度和足底压力数据:下肢姿态角度包括左、右大腿的角度变化,主要用于严肃游戏动作交互;足底压力数据单侧分为 3 个分区,用于判断人体重心倾向。交互场景与游戏包括严肃游戏、丛林漫步游戏和太空遨游游戏。交互软件通过串口获取的传感器数据可以实时可视化地更新在交互界面上,具体形式为数据实际值和变化实时曲线图。

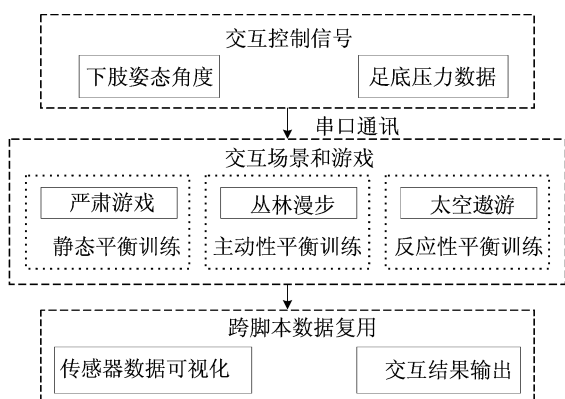


图 5 交互软件系统框图

行于人体矢状面,通过串口通讯方式实时获取姿态传感器数据,记录初始 Y 轴角度,再在训练过程中得到实时的 Y 轴旋转角度,上述两角度差值用于判断人体大腿抬起角度。使用者模仿场景中虚拟人物的双腿站立、单腿站立、高抬腿站立动作,通过传感器的 Y 轴变化角度来判断大腿抬起角度,判断训练是否达到要求。若 Y 轴变化角度大于  $25^{\circ}$ ,说明达到单腿站立训练要求,若 Y 轴变化角度大于  $45^{\circ}$ ,说明达到高抬腿站立训练要求。



图 6 严肃游戏界面

## 3.2 交互功能实现

### 3.2.1 交互系统登陆界面

本文康复训练交互系统的起始界面为系统登录界面,患者正确输入账号和姓名后点击“登录”按钮进行登录,或点击“跳过”按钮进入下一界面。用户输入信息的“姓名”将利用 Unity 事件监听功能获取和存储,便于跨场景和界面的“当前用户”显示。

### 3.2.2 训练项目选择界面

用户成功登录后,场景跳转至训练项目选择界面,“严肃游戏”“丛林漫步”“太空遨游”3 个训练游戏以按钮形式布置在该界面中,用户点击不同按钮即可跳转进入相应的康复训练游戏场景,点击“返回”按钮则退回至交互系统登录界面。界面左上角“当前用户”即为登录界面获取到的用户“姓名”信息。

### 3.2.3 严肃游戏

严肃游戏用于静平衡能力训练,场景界面如图 6 所示。该游戏包括虚拟人物训练动作示教、患者大腿状态估计、训练动作语音指引、训练语音鼓励、训练语音纠错、训练倒计时、随机音乐播放暂停续播、音量调节、传感器数据可视化和退出训练功能。

训练时,腿部传感器节点安置在人体左、右大腿中部正前方,如图 7 所示,此时传感器 Y 轴平



图 7 腿部传感器节点示意图

### 3.2.4 丛林漫步游戏

丛林漫步游戏用于主动性平衡能力训练,场景界面如图 8 所示。



图 8 丛林漫步游戏界面

该游戏包括压力传感器数据读取、虚拟人物漫游、虚拟人物特写小地图和计时得分功能,同时也具备随机音乐播放暂停续播、音量调节、传感器数据可视化和退出训练功能。

使用 USB2185A 数据采集卡实时采集双脚 24 路压力传感器的数据,将左、右两侧传感器足跟区受力大小标记为  $F_{LHP}$ 、 $F_{RHP}$ ,左、右两侧脚掌内侧区受力大小标记为  $F_{LSM}$ 、 $F_{RSM}$ ,左、右两侧脚掌外侧区受力大小标记为  $F_{LSL}$ 、 $F_{RSL}$ ,每个分区的受力大小为该分区内 4 个传感器的压力采集值总和。

当传感器数据满足式(1)时,设定虚拟人物向前行走,即

$$F_{LSM} + F_{LSL} + F_{RSM} + F_{RSL} \geq F_{LHP} + F_{RHP} \quad (1)$$

当传感器数据满足式(2)时,设定虚拟人物停止前进,即

$$F_{LSM} + F_{LSL} + F_{RSM} + F_{RSL} < F_{LHP} + F_{RHP} \quad (2)$$

当传感器数据满足式(3)时,设定虚拟人物向左转身,即

$$F_{LSM} + F_{LSL} + F_{LHP} > F_{RSM} + F_{RSL} + F_{RHP} \quad (3)$$

当传感器数据满足式(4)时,设定虚拟人物向右转身,即

$$F_{RSM} + F_{RSL} + F_{RHP} > F_{LSM} + F_{LSL} + F_{LHP} \quad (4)$$

### 3.2.5 太空遨游游戏

太空遨游游戏用于反应性平衡能力训练,场景界面如图 9 所示。



图 9 太空遨游游戏界面

太空遨游游戏主要包括虚拟太空飞船漫游、视觉扰动和听觉扰动、压力传感器数据读取、任务得分和计时得分功能,同时也具备随机音乐播放暂停续播、音量调节、传感器数据可视化和退出训练功能。

太空飞船漫游规则与丛林漫步游戏中虚拟人物漫游控制方法相似。训练时,游戏场景中会随机产生“陨石”并伴有特效音频,用以干扰患者平衡状态,进而训练其受到扰动时自主恢复平衡状

态的反应性平衡能力。

### 3.3 传感器数据可视化

心理学原理表明,生物反馈放松法有助于缓解患者紧张情绪,交互软件的 3 个游戏场景均为患者提供了传感器数据的实时视觉反馈,用户点击各场景“传感器数据”按钮即可查看传感器的实时数据和曲线图,以此了解自身状态。

## 4 系统测试实验

为测试系统各模块相关功能的正确性以及整个系统的稳定性,分别对压力传感器和姿态传感器、人体下肢动作识别、训练结果评价功能进行测试。

### 4.1 压力传感器和姿态传感器测试

人体右腿站立重心前倾和高抬右腿站立重心前倾状态下,压力传感器在 3 个分区内的实时数据和曲线图分别如图 10、图 11 所示。

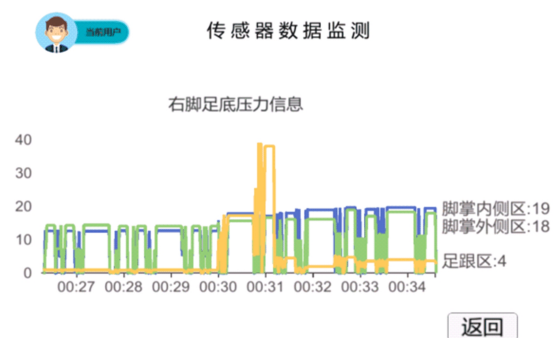


图 10 右腿站立重心前倾时压力传感器数据

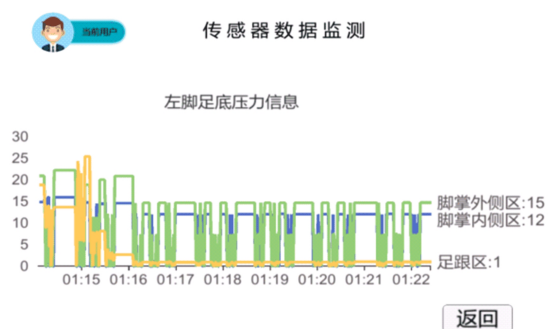


图 11 高抬右腿站立重心前倾时压力传感器数据

人体单腿站立状态下,左、右两侧大腿部姿态传感器欧拉角解算实时数据和曲线图(左腿站立时)分别如图 12、图 13 所示。

测试结果表明,本文交互系统具备良好的信号采集和数据处理能力,能准确反映系统使用者的实时状态,为使用者提供实时视觉反馈,辅助使用者进行康复和放松训练,满足平衡能力交互训练的控制信号需求。

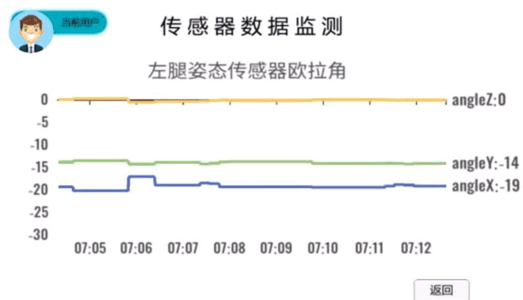


图 12 左腿站立时左腿姿态传感器数据

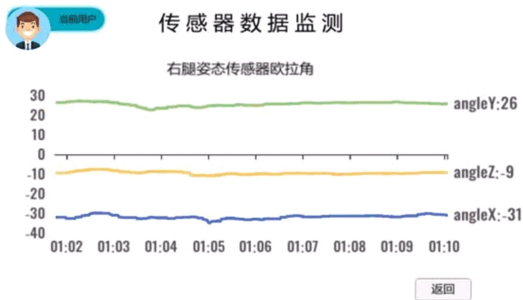


图 13 左腿站立时右腿姿态传感器数据

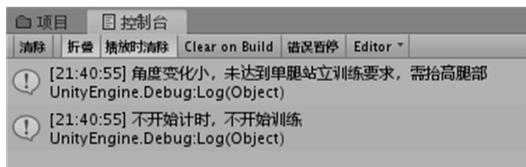
### 4.2 人体下肢动作识别测试

严肃游戏中,单腿站立的最低抬腿要求为 25°,高抬腿站立的最低抬腿要求为 45°,交互软件每隔 5 s 进行 1 次角度检测。当未达到角度要求时系统控制台输出“角度变化小,未达到训练要求,请继续抬高腿部”;当达到角度要求时系统控制台输出“已达到训练要求,可以进行训练”。满足训练要求的时刻为计时起点,开启训练倒计时。

测试过程如下:

1) 首先选择单腿站立训练,传感器 Y 轴转至 15°时,Unity3D 控制台输出结果如图 14a 所示,传感器 Y 轴转至 30°时,输出结果如图 14b 所示。

2) 选择高抬腿站立训练,传感器 Y 轴转至 35°时,Unity 3D 控制台输出结果如图 15a 所示,传感器 Y 轴转至 50°时,输出结果如图 15b 所示。

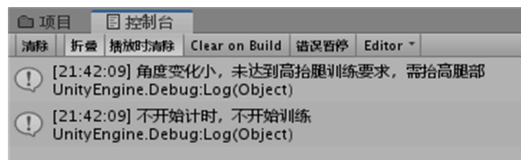


(a) 15°时控制台输出结果



(b) 30°时控制台输出结果

图 14 单腿站立动作识别结果



(a) 35°时控制台结果



(b) 50°时控制台结果

图 15 高抬腿站立动作识别结果

测试结果表明,本文交互系统能够实时解算姿态传感器的角度,交互逻辑设计合理,能准确识别人体下肢状态,语音交互功能可靠,能够满足严肃游戏的静态平衡能力交互控制需求。

### 4.3 训练结果评价测试

测试实验选取 6 名健康受试者进行 3 个康复游戏的训练任务,交互系统中训练结果评价指标与记分规则如图 16 所示,评价结果输出如图 17 所示。

6 名受试者的实验结果见表 1 所列。

测试结果表明,本文交互软件能够实时地反映交互系统使用者最近一次的训练结果。

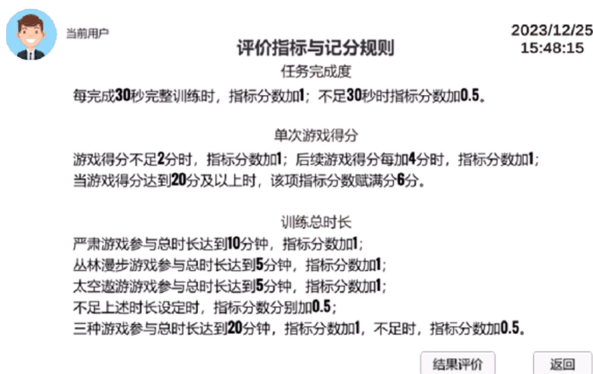


图 16 训练结果评价指标与记分规则界面



图 17 训练结果评价输出界面

表1 6名受试者训练结果

编号	性别	任务完成度	单次游戏得分	训练总时长	总得分
1	女	10	10	4	24
2	女	9	10	5	24
3	女	10	9	6	25
4	男	10	8	4	22
5	男	9	9	5	23
6	男	10	10	6	26

## 5 结 论

本文制定了一套平衡能力训练和交互策略,并设计开发了一套基于足底力与姿态信息的平衡能力训练交互系统。测试实验结果表明:平衡训练时,交互系统具备良好的信号采集和数据处理能力,使用者可以通过曲线图显示的传感器数据实时了解自身状态;交互系统能实时解算姿态传感器的角度,准确识别人体下肢状态,让使用者可以顺利地通过严肃游戏来进行静态平衡能力训练;使用者在完成3个训练游戏任务后,交互软件能实时准确地反映使用者的训练结果。

该交互系统可以提升静态平衡能力、主动性平衡能力和反应性平衡能力,并在训练时有多种视觉和听觉反馈,保证了交互系统的沉浸性和互动性,有利于患者进行平衡能力训练。该交互系统平衡能力训练效果后续需要与医院进一步合作,以继续完善不足之处。

## [参 考 文 献]

- [1] STURNIEKS D L, GEORGE R S, LORD S R. Balance disorders in the elderly[J]. *Neurophysiologie Clinique/Clinical Neurophysiology*, 2008, 38(6):467-478.
- [2] NASHNER L M, SHUPERT C L, HORAK F B. Head-trunk movement coordination in the standing posture[J]. *Progress in Brain Research*, 1988, 76:243-251.
- [3] SHUMWAY-COOK A, ANSON D, HALLER S. Postural sway biofeedback: its effect on reestablishing stance stability in hemiplegic patients[J]. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 1988, 69(6):395-400.
- [4] 中国老年保健医学研究会老龄健康服务与标准化分会, 杂志编辑委员会中国老年保健医学, 北京小汤山康复医院. 中国社区平衡功能障碍评定与康复治疗技术专家共识[J]. *中国老年保健医学*, 2019, 17(4):27-36.
- [5] 黄长建, 赵鹏鹏, 王勇. 下肢康复机器人足底力分布测量装置的研究[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2020, 43(2):170-175.
- [6] 中国老年保健医学研究会老龄健康服务与标准化分会, 杂志编辑委员会中国老年保健医学. 中国老年人跌倒风险评估专家共识(草案)[J]. *中国老年保健医学*, 2019, 17(4):47-48, 50.
- [7] SCHWENK M, GREWAL G S, HONARVAR B, et al. Interactive balance training integrating sensor-based visual feedback of movement performance: a pilot study in older adults[J]. *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, 2014, 11:1-13.
- [8] YANG W, WANG H, WU R, et al. Home-based virtual reality balance training and conventional balance training in Parkinson's disease: a randomized controlled trial[J]. *Journal of the Formosan Medical Association*, 2016, 115(9):734-743.
- [9] ANNA B, WOJCIECH M, ANNA K, et al. Biomechanical measures of balance after balance-based exergaming training dedicated for patients with Parkinson's disease[J]. *Gait & Posture*, 2021, 87:170-176.
- [10] 高鹏彬. 基于虚拟现实的人体平衡能力评测及训练系统设计及实现[D]. 郑州: 郑州大学, 2020.
- [11] 凌微华. 平衡功能检测评估与康复训练系统[D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
- [12] 李燕, 黄丽华. 老年人平衡能力评估及干预的研究进展[J]. *中华护理杂志*, 2019, 54(4):603-608.
- [13] 刘玉磊, 马艳阳, 徐伯初, 等. 车载智能预警系统中的人机交互[J]. *包装工程*, 2020, 41(18):78-89.
- [14] 余艾琪. 沉浸式虚拟现实心理放松游戏的设计及体验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [15] BAOLIANG C, XIAOFAN M, RUONAN D, et al. Postural stability assessment method and its validation based on plantar three-partition distributed force measurement[J]. *Measurement*, 2022, 203:111940.

(责任编辑 胡亚敏)