

基于足过度旋前康复的交互式游戏系统设计

徐晶晶, 邹任玲, 章浩博, 徐澜菲, 李 丹

(上海理工大学健康科学与工程学院, 上海 200093)

✉ 1419607407@qq.com; zourcenling@163.com; 297933466@qq.com; 1046758980@qq.com; lidan0734454454@163.com



摘 要:足过度旋前是常见的足部功能障碍,会引起人体足部姿势与下肢力线的改变。肌肉训练是一种有效的运动康复治疗模式。文章采用临床动作范式,设计了一款交互式虚拟训练系统。该系统包括游戏训练模块和康复评估模块。游戏训练模块在患者训练时将动作实时映射到游戏的虚拟人物动作中,实现交互式游戏训练。康复评估模块实现在训练前和训练后对患者进行静态姿势评估,为医生后续诊断评估提供参考依据。对系统的功能进行测试,测试结果初步表明,系统将三种针对足过度旋前康复训练动作顺利地融入了游戏任务中,实验者主观评价腿部肌肉的疲劳程度与预设目标基本符合,说明系统能够达到预期效果。该研究为足过度旋前的康复提供了一种新的训练方式,能促进患者训练,具有一定临床应用价值。

关键词:足过度旋前;肌肉训练;训练评估

中图分类号:TP31 **文献标志码:**A

Design of an Interactive Game System Based on Excessive Foot Pronation Rehabilitation

XU Jingjing, ZOU Renling, ZHANG Haobo, XU Lanfei, LI Dan

(School of Health Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

✉ 1419607407@qq.com; zourcenling@163.com; 297933466@qq.com; 1046758980@qq.com; lidan0734454454@163.com

Abstract: Excessive foot pronation is a common foot dysfunction that can cause changes in foot posture and lower limb force lines. Muscle training is an effective exercise rehabilitation treatment model. This paper proposes to design an interactive virtual training system with a clinical action paradigm. The system includes a game training module and a rehabilitation evaluation module. The game training module maps real-time actions to virtual character actions in the game during patient training, achieving interactive game training. The rehabilitation assessment module realizes static posture assessment of patients before and after training, providing reference basis for doctors to conduct subsequent diagnosis and assessment. The results of the system function test initially show that the system has successfully integrated three types of rehabilitation training movements for excessive foot pronation into the game task. And the experimenter's subjective evaluation of the fatigue leg muscles is basically in line with the preset goals, indicating that the system is able to accomplish the expected results. This study provides a new training method for the rehabilitation of excessive foot pronation, which can promote patient training and has certain clinical application value.

Key words: excessive foot pronation; muscle training; training evaluation

0 引言(Introduction)

足过度旋前是指患者的足部在一个步态周期中旋前超过

25%,它是对异常足部软组织或骨性结构的代偿^[1]。足部长期处于异常姿势,会改变人体的正常步态,导致膝关节、髋关节、

脊柱、肩关节、颈椎产生代偿性损伤^[2]。目前针对足过度旋前的保守治疗方法包括佩戴足矫形器、穿戴具有运动控制作用的鞋、进行肌肉训练和采用贴扎技术等^[3]。其中,肌肉训练对足过度旋前的临床效果是目前研究的热点。陈雪梅等^[4]对研究对象进行肌肉平衡训练,发现经过肌力平衡矫正训练患者的足外旋和内旋等问题得到不同程度的改善。杨兵等^[5]对研究对象进行肌肉训练,发现随着研究对象的旋后肌力量增大,足跟接触地面时足底后倾增大,而随着胫骨前肌力增大,研究对象行走时与地面的反作用力增大,使足旋前症状得到改善。TADDEI等^[6]将研究对象分为干预组 and 对照组,干预组接受针对足核心肌群和关节肌肉的训练,对照组仅进行相同时间的牵伸,研究发现干预组的足部力量和足部姿势相比对照组,得分更高,跑步相关损伤降低了 58.68%。

上述研究表明,传统的肌肉训练可以有效改善足过度旋前问题,但目前肌肉训练过程一般需要在医生的指导下进行,训练环境单调,动作单一枯燥,患者很难长期坚持。因此,本文拟根据临床动作范式,设计一款用于足过度旋前患者训练动作的系统,实现交互式游戏训练,帮助患者进行肌力训练,设置虚拟场景,提高训练过程的趣味性。此外,系统设置了评估模块,确保训练的精准性和训练效果。

1 总体设计思路(Overall design ideas)

基于足过度旋前康复的交互式游戏系统由 Kinect 体感设备(由微软公司开发的一款姿态传感输入设备)和康复训练软件系统两个部分组成。Kinect 体感设备配备深度摄像头和彩色摄像头,通过采集图像数据,结合 Exemplar 算法实现对人体骨骼关节点进行追踪。足过度旋前康复的交互式游戏系统设计结构如图 1 所示。软件训练系统利用 Unity 开发平台设计游戏场景,完成游戏逻辑,系统获取 Kinect 计算的骨骼数据,将骨骼数据映射到虚拟游戏人物模型中,完成游戏任务;计算静态姿势下骨骼关节点在冠状面、矢状面和水平面的角度,对比训练前后骨骼关节点角度变化,为医生诊断评估提供参考依据。

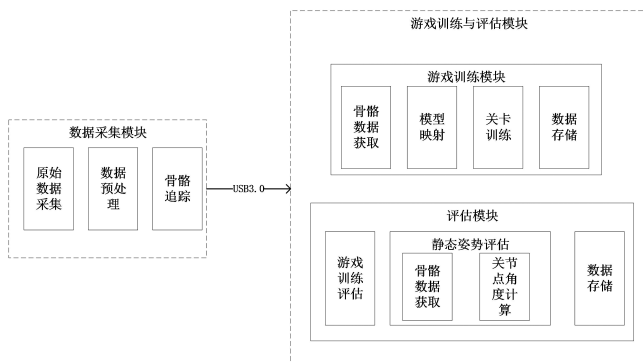


图 1 足过度旋前康复的交互式游戏系统设计结构

Fig. 1 Design structure of an interactive game system for rehabilitation of excessive foot pronation

2 系统软件设计(System software design)

肌肉训练作为足过度旋前的治疗手段之一,其有效性在临床中已得到验证^[7]。本文根据肌肉训练原理,采用双腿微蹲站立、双腿交替高抬腿以及持续微蹲三个康复训练动作,增加患者腿部肌肉力量,提高其膝关节和踝关节的稳定性,从而改善足过度旋前程度^[8]。通过上述三个康复训练动作作为足过度旋前患者设计了一种交互式游戏康复系统,其软件系统包括两大模块:游戏训练模块和训练评估模块,系统模块界面图如图 2 所示。游戏设计模块使用 Unity3D 游戏开发引擎,利用 Autodesk 3Ds Max 软件制作游戏模型。将虚拟现实技术与 Kinect 设备相结合,提高人机交互的友好性。评估模块又分为两个部分:一是对患者的游戏训练数据进行评估;二是通过静态姿势获取骨骼关节点,并进行角度与位置的计算与分析,为医生对患者训练前后效果评估提供参考依据。



图 2 系统模块界面图

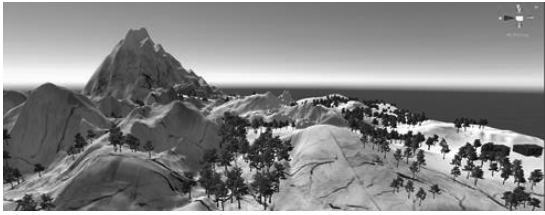
Fig. 2 Diagram of system module interface

2.1 游戏训练模块

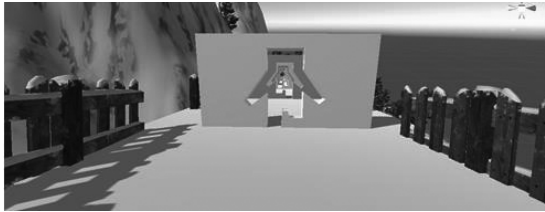
2.1.1 游戏场景设计

为了将康复动作融入游戏中,基于临床中肌肉训练动作与滑雪动作类似,系统将滑雪场景设定为主题场景。游戏任务设为用户滑雪通过障碍物,因此游戏场景元素以雪山为主。利用 Unity 软件中的地形系统设计雪山地形,并添加各类相关的材质。为了使游戏场景更加逼真,游戏中加入了树木、房子等模型,效果如图 3(a)所示。滑雪跑道由 Autodesk 3Ds Max 软件设计制作,跑道上设置与滑雪动作相符的人形障碍物,两端添加栏杆,跑道效果如图 3(b)所示。跑道设置碰撞器和触发器,如图 3(c)所示的线条,用于检测人物运动到指定点时设置碰撞与触发事件。以三段跑道为一组,如图 3(d)所示,分别在每段跑道中间添加一个触发器,通过脚本设置无限跑道生成。脚本逻辑是游戏人物从 1 号跑道位置开始滑行,当模型触发 2 号跑道的触发器,1 号跑道自动转移到 3 号跑道后的跑道位置,以此类推,即当触发 3 号跑道的触发器后,2 号跑道会转移到 1 号跑道后的跑道位置。因此,在游戏视角中的跑道是无限延

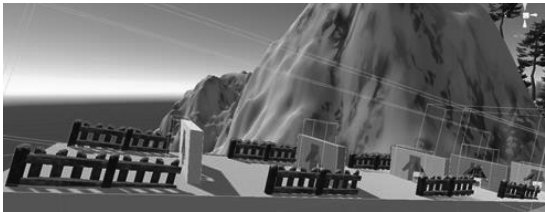
长的。无限跑道的设置便于用户在游戏规定时间内尽可能多地完成通过障碍物的任务,并减少游戏计算量,从而优化程序性能。



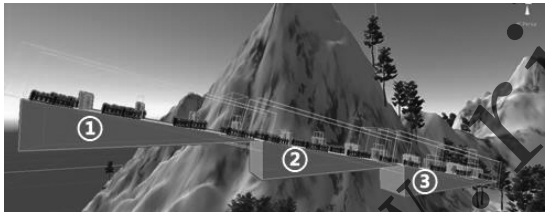
(a)雪山场景效果图



(b)玩家视角图



(c)碰撞器与触发器设置图



(d)无限跑道图

图3 跑道效果图

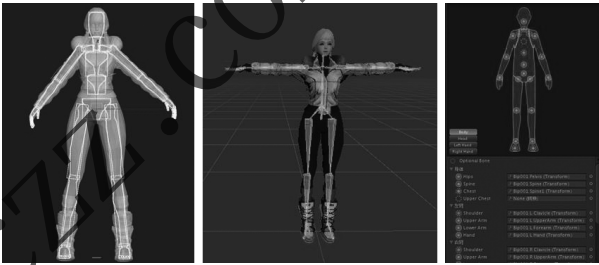
Fig. 3 Diagram of runway effect

2.1.2 游戏模型映射

在游戏场景中,系统将患者实际姿势映射到虚拟游戏人物模型中完成游戏任务,帮助患者进行肌肉训练。模型映射是指将 Kinect 体感设备识别到的患者关键骨骼点映射到虚拟游戏人物模型的相应骨骼点中。当 Kinect 体感设备捕捉到患者骨骼点的位置发生变化时,将带动虚拟游戏人物模型相应骨骼点位置发生位移或旋转,从而实现动作复刻。虚拟游戏人物模型实现动作复刻,需要映射人体躯干的主要关节。

本系统中模型映射关节包括头部、颈部、骨盆、肩关节、肘关节、腕关节、手指、脊柱中心、脊柱下部、髋关节、膝关节、踝关节、脚趾。游戏人物模型由 Autodesk 3Ds Max 软件设计制作,通过建模布线制作人物模型,并将人物模型进行蒙皮,将模型人物骨架(Biped)中的骨骼调整到模型中,通过“编辑封套”与

设置权重即可为模型绑定骨骼,绑定骨骼效果图如图 4(a)所示。将模型以 .fbx 格式导入 Unity3D 软件中。Unity 引擎具有丰富且复杂的动画系统,其中 Humanoid 是人形动画,可以实现人形动画重定向功能,结合 Unity 引擎内置,实现模型动画的关键枚举类型 HumanBodyBones 和 Kinect 设备与人物模型的实时映射^[9]。将模型的 Animation Type 设置为 Humanoid 后,查看 Avatar 骨骼映射并设置骨骼位置,配置 Avatar 效果图如图 4(b)所示。系统提供直观配置骨骼映射方式,即通过配置 Avatar 骨骼运动与 Biped 骨骼对应关系,如图 4(c)所示,精准配置 Biped 骨骼与 Avatar 骨骼对应。模型准备结束后给 Camera 添加 KinectManager 脚本并设置脚本属性,给游戏人物模型添加 AvatarController 脚本,将 Kinect 体感设备采集到的骨骼点与 Avatar 骨骼点对应。Kinect 体感设备在传输新的数据后,HumanBodyBones 更新人物模型对应关节和角度信息,实现将患者实际姿势映射到虚拟游戏人物模型中。



(a)绑定骨骼效果图 (b)配置 Avatar 效果图 (c)贴图效果图

图4 骨骼映射效果图

Fig. 4 Skeleton mapping diagram

2.1.3 肌肉训练虚拟交互动作设计

造成足过度旋前的原因包括腿部肌肉失常和足底肌肉失常。其中,腿部肌肉问题包括胫骨前肌、胫骨后肌无力,腓骨肌群过度活跃,股二头肌过度紧张以及臀中肌、臀大肌不够活跃等^[10]。足底肌肉问题包括足底屈肌无力、足部缓冲功能缺失等,会导致足底屈肌和筋膜组织因承受牵拉力太大而易受伤^[11]。

因此,针对足过度旋前的治疗主要有锻炼腿部肌肉和锻炼足底肌肉两大方向。采用双腿微蹲站立、双腿交替高抬腿以及持续微蹲三个腿部肌肉康复动作锻炼腿部肌肉,实现对于足过度旋前的康复训练^[12]。其中,双腿微蹲站立要求患者保持上身挺直,视线看向正前方,双脚分开略宽于肩,下蹲时不可过快、过猛,先屈髋再屈膝,膝盖前部不超过脚尖,重心尽量靠后,双脚紧贴地面,蹲至大腿平行于地面^[13],股四头肌、腓绳肌和内收肌呈紧绷状态,此时缓慢起身,髋部向上发力,臀中肌和臀大肌活跃。双腿交替高抬腿要求患者保持身体挺直,重心稳定,抬一侧腿至大腿与地面大约平行,脚尖勾起,抬起腿落地的同时,支撑腿用力蹬地抬起,其过程用来刺激髋部肌群、小腿三

头肌、臀肌及踝部肌群等^[14]。持续微蹲要求患者双脚平行站立与肩同宽,脚尖朝前,双腿伸直,臀部收紧,双臂自然下垂,屈膝屈髋下蹲,直至大腿与地面平行,缓慢起身,与双腿微蹲站立相比,保持下蹲动作时间较长,臀大肌、股四头肌、腓绳肌和内收肌紧绷时间更长,有利于锻炼臀部和腿部肌肉力量,增强下肢稳定性^[15]。

根据以上三个训练动作,将游戏分为三个关卡,每个关卡中设置相应的障碍物,提示并帮助患者完成康复训练动作,关卡设置障碍物的详细信息如表 1 所示。由于双腿微蹲站立与持续微蹲动作相似,若将两个关卡设置成前后相连的顺序会导致股四头肌、腓绳肌和内收肌持续紧绷,容易导致受伤。对以上两个动作进行排序时,考虑运动锻炼需循序渐进,持续微蹲动作对肌肉要求更高,因此选择双腿微蹲站立为第一关卡,并在两个关卡中间用双腿交替高抬腿关卡隔开,将运动肌群从大腿肌群分散部分到小腿与踝部肌群,降低患者受伤风险。

表 1 游戏训练关卡设置

Tab.1 Game training level settings

名称	结合康复动作	障碍物	通过障碍物方式	康复目标
关卡 1	双腿微蹲站立		保持身体直立通过较高的障碍物;微蹲通过较矮的障碍物	增强腿部股四头肌、腓绳肌和内收肌肌肉力量
关卡 2	双腿交替高抬腿		保持身体直立,分别抬高左腿和右腿通过障碍物	增强腿部力量,提高踝关节和膝关节的柔韧性和协调性
关卡 3	持续微蹲		双腿分开与肩同宽,缓慢下蹲至大腿与地面约平行,通过障碍物	增强臀大肌和臀中肌力量,增强腿部股四头肌、腓绳肌和内收肌肌肉力量

患者在完成每个关卡任务后,自动进入下一关卡,每个关卡中的障碍物设有碰撞器和触发器,通过编写脚本中的 OnTriggerEnter (Collider collider) 和 OnCollisionEnter (Collision collision) 函数,系统可以检测用户是否顺利通过障碍物或是否触碰障碍物。每个关卡结束后,系统自动将通过与触碰障碍物的数量以及分数分别存入数据库中,为训练评估提供依据。

2.2 评估模块

2.2.1 游戏训练评估

患者游戏训练结束后,系统会将患者训练结果记录到数据库中,并显示在游戏训练评估界面,评估图如图 5(a) 所示。其中,系统默认设定每个游戏基本训练时长为 30 s,若患者的训练总时长少于 90 s,则说明患者没有完成全部游戏训练。结合游戏障碍物设置,与游戏人物滑行速度调节情况,经测试站立蹲起数量一般为 10~25 个,单腿站立数量一般为 10~15 组,

持续微蹲动作数量一般为 3~5 组。根据碰撞次数可推断患者训练中不标准动作的次数。医生根据上述动作数量范围,针对患者的训练结果做出大致判断,结合静态姿势评估结果[图 5(b)],为患者的动作训练制订新的计划,如增加某一关卡训练时间或减少某一关卡障碍物数量等。



(a) 游戏训练评估图

(b) 静态姿势评估图

图 5 评估图

Fig. 5 Evaluation chart

2.2.2 静态姿势评估

对患者进行评估是个体精准康复训练的基础,临床上对足过度旋前的评估多用舟骨下降高度测试足部姿势指数,其评定过程通常基于医生经验。但是,足过度旋前会影响胫骨、膝关节、股骨、脊柱的力线,引起胫骨过度内旋,造成膝关节与踝关节在冠状面、矢状面和水平面的角度变化。Kinect 体感设备测量躯干和下肢关节角度的有效性已得到验证^[16]。

本系统通过静态姿势计算患者关节角度,要求 Kinect 体感设备放置于距地面 0.8 m、距患者 2 m 的位置,患者保持身体直立,面向前方,双足并拢,足尖向前,双上肢自然下垂于躯干两侧。通过 Kinect for Windows SDK 提供的骨骼追踪功能,获取骨骼位置。本系统计算使用左右髋关节、膝关节、踝关节和脚部共 8 个关节点的数据,其坐标系设置为以 Kinect 体感传感器为原点,Z 轴垂直于 Kinect 正面;Y 轴垂直于 Kinect 底部;X 轴与 Kinect 前表面平行。Kinect 体感设备可以以 30 帧/s 的速度捕捉目标人体 25 个骨骼关节的 3D 坐标,本系统设定采样时间为 3 s,通过计算上述 8 个关节点的平均值得到关节点的三维坐标,计算结果的评估界面如图 5(b) 所示。

得到骨骼关节点位置数据之后,可以通过计算关节点之间的向量坐标,运用空间向量法计算关节点向量角度,计算公式如下:

$$\theta = \arccos \frac{\alpha \cdot \beta}{|\alpha| |\beta|} \quad (1)$$

以左侧关节角度计算为例,如图 6 所示,基于左侧髋关节(点 A)、左侧膝关节(点 B)、左侧踝关节(点 C)以及左侧脚部(点 D),从冠状面、矢状面和水平面分别计算左膝关节和左踝关节的角度。以左膝关节 B 点为基本点,连接髋关节 A 点,方向指向髋关节得到向量 $\overrightarrow{BA}$,连接踝关节 C 点,方向指向踝关节得到向量 $\overrightarrow{BC}$,代入公式(1)计算 $\angle ABC$ 。以左踝关节 C 点为基本点,连接膝关节 B 点,方向指向膝关节得到向量

CB ,连接脚部 D 点,方向指向脚部得到向量 CD ,代入公式(1)计算 $\angle BCD$ 。其中各平面关节向量计算过程如表 2 所示。

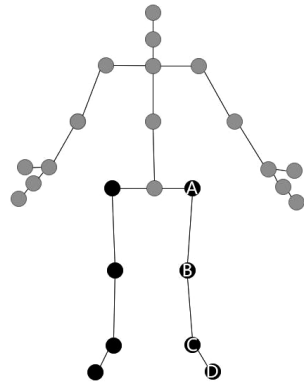


图 6 Kinect 识别人体关节点结构示意图

Fig. 6 Schematic diagram of Kinect recognizing the structure of human joint points

表 2 各平面左侧关节向量计算表

Tab.2 Calculation of joint vectors on the left side of each plane

平面	左膝关节	左踝关节
冠状面	$BA=(X_A-X_B,Y_A-Y_B)$	$CB=(X_B-X_C,Y_B-Y_C)$
	$BC=(X_C-X_B,Y_C-Y_B)$	$CD=(X_D-X_C,Y_D-Y_C)$
矢状面	$BA=(Z_A-Z_B,Y_A-Y_B)$	$CB=(Z_B-Z_C,Y_B-Y_C)$
	$BC=(Z_C-X_B,Z_C-Y_B)$	$CD=(Z_D-Z_C,Y_D-Y_C)$
水平面	$BA=(Z_A-Z_B,X_A-X_B)$	$CB=(Z_B-Z_C,X_B-X_C)$
	$BC=(Z_C-X_B,X_C-X_B)$	$CD=(Z_D-Z_C,X_D-X_C)$

随着胫骨内旋角度变大,跟骨外翻角度与踝关节内翻角度会相应变大,进一步引起相关肌肉韧带损伤,最终导致足痛、膝痛等慢性疼痛的发生。一般足过度旋前评估由医生结合足姿指数(Foot Posture Index, FPI)量表^[17]中的触诊和视觉评估对患者进行测试评分,但容易受主观因素和外界条件的影响。本系统通过计算左右侧膝关节和踝关节在直立时的角度,对比患者在训练前后膝关节内旋角度与踝关节内翻角度变化情况,从而评估患者在训练前后的足旋前程度是否发生变化,为医生诊断评估提供参考依据。

3 游戏测试(Game testing)

系统的主要功能模块通过实验进行测试,实验中,测试者根据软件提示进行相应的动作训练。实验者在第一关中按提示微蹲通过深色障碍物,站立通过浅色障碍物,完成时间为 30 s,完成 10 组动作;在第二关中按提示抬起右脚通过浅色障碍物,抬起左脚通过深色障碍物,完成时间为 30 s,完成 8 组动作;在第三关中按提示持续微蹲通过障碍物,完成时间为 30 s,完成 4 组动作。游戏测试图如图 7 所示,实验者实现了三组动

作的训练,分别完成游戏任务。通过每个游戏关卡后,实验者立即根据自感疲劳进行疲劳程度主观评价,得出自感疲劳等级(Rating of Perceived Exertion, RPE)^[18],实验结果如表 3 所示。表 3 中,将腿部分为 4 大区域肌肉群,疲劳等级由数字表示,其中等级 1 表示不累,2 表示较不累,3 表示一般累,4 表示较累,5 表示很累。



(a)第一关训练图



(b)第一关游戏图



(c)第二关抬右脚训练图



(d)第二关抬右脚游戏图



(e)第二关抬左脚训练图



(f)第二关抬左脚游戏图



(g)第三关训练图



(h)第三关游戏图

图 7 游戏测试图

Fig. 7 Game test chart

表 3 自感疲劳等级表

Tab.3 The table of RPE

名称	大腿前侧	大腿后侧	小腿前侧	小腿后侧
关卡 1	4	4	2	2
关卡 2	3	4	2	4
关卡 3	5	5	3	3

实验结果表明:在关卡 1 中,实验者感觉大腿前侧与大腿后侧较累,说明关卡 1 的训练对大腿的股二头肌群与内收肌等锻炼作用明显;在关卡 2 中,实验者感觉大腿后侧与小腿后侧较累,说明关卡 2 的训练对腓肠肌内侧与外侧等锻炼作用明

显,大腿后侧股二头肌群保持活跃状态;在关卡3中,实验者的大腿与小腿的疲劳程度都较高,说明关卡3的训练强度较大,对大腿股外侧肌、股直肌等肌群、股二头肌群与小腿腓肠肌群等锻炼作用较大。

4 结论(Conclusion)

临床实验初步表明,系统将三种针对足过度旋前康复训练动作融入游戏任务中,帮助患者取得了较好的训练效果。游戏使用 Kinect 体感设备,可以实时获取患者姿势并映射到虚拟游戏人物中,使患者可以通过康复动作训练完成游戏任务,获取积分。游戏虚拟场景可以让患者沉浸于游戏中,提高训练乐趣。在评估模块中,本系统通过获取 Kinect 体感设备识别的骨骼点位置,分别计算左右膝关节、踝关节在冠状面、矢状面和水平面的角度,通过对比训练前后角度变化,为医生诊断评估提供参考依据。系统总体上达到了设计要求,但对下肢缺少足部肌肉训练方式,在评估方面缺少足部姿势等数据,因此完善设计足部肌肉训练的游戏并结合足姿评估,可以进一步完善训练与评估系统的功能。

参考文献(References)

- [1] GHANI N S, ABD RAZAK N A, USMAN J, et al. Foot over pronation problem among undergraduate students: a preliminary study[J]. Sains Malaysiana, 2020, 49(7): 1651-1662.
- [2] 徐纯鑫, 陆洋洋, 谭景旺, 等. 全身垂直律动疗法改善痉挛型双瘫脑性瘫痪患儿扁平外翻足的临床疗效观察[J]. 中国康复医学杂志, 2021, 36(11): 1390-1395.
- [3] 郑淞尹, 王艳, 项栋良, 等. 运动机能贴布结合运动训练治疗脑瘫患儿足外翻疗效观察[J]. 康复学报, 2020, 30(3): 230-234.
- [4] 陈雪梅, 王梁. 肌力平衡矫正训练对于青年男子篮球运动员足底压力的影响[J]. 曲阜师范大学学报(自然科学版), 2019(1): 112-116.
- [5] 杨兵, 王占峰, 赵素霞, 等. 纠正性运动计划对腰痛伴足过度旋前的老年人步态动力学和肌肉活动的影响[J]. 颈腰痛杂志, 2022, 43(6): 928-930.
- [6] TADDEI U T, MATIAS A B, DUARTE M, et al. Foot core training to prevent running-related injuries: a survival analysis of a single-blind, randomized controlled trial[J]. The American journal of sports medicine, 2020, 48(14): 3610-3619.
- [7] SASAKI S, TSUDA E, YAMAMOTO Y, et al. Core-muscle training and neuromuscular control of the lower limb and trunk[J]. Journal of athletic training, 2019, 54(9): 959-969.
- [8] 吕凤立. 针刺足少阳、阴跷脉穴结合站立位重心控制练习对中风后足内翻患者康复的影响[J]. 辽宁中医杂志, 2021, 48(6): 207-210.
- [9] 唐云龙, 陈平. 基于 3ds max 和 unity 3d 技术的校园虚拟漫游系统设计[J]. 现代商贸工业, 2022, 43(16): 246-248.
- [10] YULIANDRA R, NUGROHO R A, GUMANTAN A. The effect of circuit training method on leg muscle explosive power[J]. Active: journal of physical education, sport, health and recreation, 2020, 9(3): 157-161.
- [11] TOOMAN K, WEILER J. Trial of the NewGait™ to alter running mechanics in a high school athlete: a case report[J]. Orthopaedic physical therapy practice, 2022, 34(4): 233-237.
- [12] 桑鹏. 运动康复训练对脑卒中后痉挛性足内翻患者的治疗效果观察[J]. 双足与保健, 2019, 28(20): 59-60.
- [13] 袁雷. 脑卒中患者膝关节过伸的康复治疗[J]. 按摩与康复医学, 2022, 13(4): 14-17.
- [14] 赵灿灿, 赵胜秋, 赵俊玲. 运动性引导想象训练结合电动深层肌肉刺激对脑卒中患者神经功能缺损、下肢功能及 NGF、BDNF 水平的影响[J]. 临床和实验医学杂志, 2021, 20(12): 1323-1327.
- [15] 赵田芋, 晋松, 张迪, 等. 八段锦训练治疗髌腱末端病的随机对照: 改善疼痛、肌肉柔韧性及下肢平衡稳定性[J]. 中国组织工程研究, 2022, 26(11): 1662-1668.
- [16] VINCENT-GENOD D, RIPPET P, COTON J, et al. Scoring people with spinal muscular atrophy on the motor function measure using the microsoft kinect[J]. Pediatric physical therapy, 2023, 35(1): 36-41.
- [17] MOISAN G, MCBRIDE S, ISABELLE P L, et al. Intrarater and interrater reliability of the first metatarsophalangeal joint dorsiflexion resistance test[J]. Musculoskeletal care, 2023, 21(1): 102-107.
- [18] 许开立, 朱思易, 郝峥. 基于主客观指标的建筑工人疲劳分析[J]. 建筑经济, 2022, 43(增刊 1): 1043-1046.

作者简介:

徐晶晶(1997-),女,硕士生。研究领域:康复虚拟游戏设计。
邹任玲(1971-),女,博士,副教授。研究领域:康复医疗器械研制,生物电信号提取。
章浩博(2003-),男,本科生。研究领域:康复虚拟游戏训练。
徐澜菲(2001-),女,本科生。研究领域:康复虚拟游戏训练。
李丹(1981-),女,本科,实验师。研究领域:生物医学工程,医学影像技术。