



湖州师范学院

2023 届毕业设计(论文)

课 题 名 称: 面向脑瘫患者肢体训练 AR 系统的设计开发

课 题 名 称(英文): Design and development of an AR system
for limb training in cerebral palsy

学 生 姓 名: 罗思莹 学 号: 2019082520

专 业 名 称: 物联网工程

指 导 教 师: 王泽峰 职 称: 教授

所 在 学 院: 信息工程学院

完 成 日 期: 2023 年 4 月 26 日

教务处制表

面向脑瘫患者肢体训练 AR 系统的设计开发

摘要: 我国脑瘫患者基数大, 患病率高, 对脑瘫患者自身以及家庭的影响十分严重, 而在今天的智能时代背景下, 数字工具与我们的生活密不可分, 脑瘫患者也不例外。体感游戏作为电子游戏的一种, 具备游戏的优点, 又可以进行运动, 已经初步应用于康复训练领域中。但这种康复训练通常需要佩戴相应的穿戴设备, 成本高昂, 有时还需要在特定的地点才能完成。所以如何设计一款方便普通摄像头识别的体感游戏成为目前研究的重点。

本文构建出基于游戏化 MAT 理论模型的交互体验模型, 并将其与增强现实技术结合, 设计开发了一种基于增强现实的康复训练系统, 实现了使用普通手机摄像头即可进行康复训练的目的, 旨在为脑瘫儿童康复训练提供动机, 化被动训练为主动训练, 提高脑瘫患者康复训练的效率。

本文首先对脑瘫以及相关技术进行了介绍, 然后对脑瘫患者生理心理进行分析, 从目的、行为、场景等角度对体感游戏进行深层次探讨, 得出基于游戏化 MAT 模型理论的交互体验模型。其次, 在实现交互功能时, 采用了 TensorFlow Lite 库对人体姿势进行识别, 并将人体关键点绘制到屏幕上, 同时将虚拟对象的坐标转换成屏幕坐标, 从而实现在真实场景中和虚拟对象产生碰撞交互。最后, 基于体验模型与设计策略, 将手部定位追踪技术与增强现实技术相结合, 设计开发了一款体感游戏, 在游戏中设计了一个康复训练项目: 摘星星, 并通过实验验证了该项目的可行性, 为脑瘫儿童的康复训练提供参考。

关键词: 脑瘫, 体感游戏, 增强现实, 虚实交互;

Design and development of an AR system for limb training in cerebral palsy

Abstract:China's cerebral palsy patient base is large, the prevalence is high, the impact on cerebral palsy patients themselves and their families is very serious, and in today's intelligent era, digital tools are inseparable from our lives, cerebral palsy patients are no exception. As a kind of video game, somatosensory game has the advantages of game, and can perform sports, and has been initially applied to the field of rehabilitation training. But this kind of rehabilitation usually requires wearing the appropriate wearable equipment, which is costly and sometimes needs to be completed in a specific location. Therefore, how to design a somatosensory game that is convenient for ordinary camera recognition has become the focus of current research.

In this paper, an interactive experience model based on BJ Foog's Behaviour Model is constructed, and combined with augmented reality technology, a rehabilitation training system based on augmented reality is designed and developed, which realizes the purpose of rehabilitation training using ordinary mobile phone cameras, aiming to provide motivation for rehabilitation training for children with cerebral palsy, transform passive training into active training, and improve the efficiency of rehabilitation training for patients with cerebral palsy.

Firstly, this paper introduces cerebral palsy and related technologies, then analyzes the physiology and psychology of patients with cerebral palsy, discusses somatosensory games from the perspectives of purpose, behavior, and scene, and obtains an interactive experience model based on the theory of BJ Foog's Behaviour Model. Secondly, when realizing the interactive function, the TensorFlow Lite library is used to recognize the human posture, draw the key points of the human body to the screen, and convert the coordinates of the virtual object into screen coordinates, so as to realize the interaction with the virtual object in the real scene. Finally, based on the experience model and design strategy, combining hand positioning tracking technology with augmented reality technology, a somatosensory game was designed and developed, and a rehabilitation training project was designed in the game: star picking, and the feasibility of the project was verified through experiments, providing reference for the rehabilitation training of children with cerebral palsy.

Key words: cerebral palsy, somatosensory games, Augmented reality, Virtual-real interaction;

目录

第一章 绪论	6
1.1 研究背景及意义	6
1.1.1 研究背景	6
1.1.2 研究意义	6
1.2 研究现状	6
1.2.1 体感游戏运用于脑瘫方面的研究现状	6
1.2.2 增强现实技术在体感游戏方面的研究现状	8
1.3 本章小结	9
第二章 概念理论及策略研究	10
2.1 相关概念	10
2.1.1 脑瘫	10
2.1.2 体感游戏	10
2.1.3 增强现实技术	10
2.2 理论基础	11
2.2.1 游戏化 MAT 模型	11
2.2.2 沉浸理论	12
2.3 策略研究	12
2.3.1 设计要素分析	12
2.3.2 体验模型构建	14
第三章 基于 AR 的上肢康复训练系统设计	16
3.1 系统开发环境	16
3.1.1 系统开发工具	16
3.1.2 系统环境配置	17
3.2 系统功能设计及开发	18
3.2.1 系统功能设计	18
3.2.2 系统结构设计	18

3.3 系统功能开发	18
3.3.1 BlazePose 算法	19
3.3.2 系统开发的具体步骤	19
3.3.3 交互功能的实现	21
3.3.4 游戏的打包	22
3.4 系统界面原型设计	22
第四章 基于 AR 上肢康复训练系统实现	25
4.1 摘星星训练	25
4.1.1 训练模式	25
4.1.2 测试模式	26
4.2 可行性分析	26
第五章 总结与展望	28
5.1 总结	28
5.2 展望	28
参考文献	29
致谢	32

第一章 绪论

1.1 研究背景及意义

1.1.1 研究背景

截止 2018 年,我国约有脑瘫儿童 600 万,并以每年 4.6 万的速度递增^[1],据最新统计,我国脑瘫发病率为 2.48%,患病率为 2.46%。脑瘫不仅危害儿童的身心健康,使患儿无法正常参与家庭、学习和社会活动,而且因其肢体功能受损,还会让患儿产生抑郁与焦虑。因此,对脑瘫患儿肢体康复的研究具有重要作用。

在今天的智能时代背景下,儿童的日常生活与数字工具已经密不可分,脑瘫儿童也不例外。体感游戏也是一种电子游戏,具备游戏的优点,又可以进行运动,已经运用于医疗方面的康复训练领域中。

据了解,浦东新区特殊教育学校的脑瘫学生中,大部分学生会在家中利用平板或手机玩电子游戏,游戏类型包括角色扮演类、冒险类、战争类、制作类等,类型多样,近半数的学生每天都有半小时到一小时的时间被允许玩电子游戏,一部分学生被允许在周末玩游戏,另外,有少部分的学生较少接触电子游戏,更多的是借助平板看动画或听故事、听音乐等^[2]。这说明,脑瘫儿童也是电子游戏的忠实粉丝,所以,如何将电子游戏这些数字媒体转化到他们的日常生活中,来帮助他们更好的生活是一大难题。

1.1.2 研究意义

本课题从脑瘫患者角度出发,结合体感游戏和康复训练的特点,总结了基于体感康复游戏互动体验的设计方法和策略,整理了脑瘫患者体感康复游戏的信息架构和互动界面设计。根据脑瘫患者这一特定人群的典型特征,对适用的体感游戏的交互体验进行了设计和开发,满足其康复治疗训练与游戏娱乐两者之间的平衡,来以此提高患者对康复训练的兴趣,改善患者的身体素质,增强患者运动功能,使患者身体功能最大程度的发挥,对患者尽早融入社会具有重要意义。

1.2 研究现状

1.2.1 体感游戏运用于脑瘫方面的研究现状

体感游戏属于游戏的一种,在游戏成功时,会给予脑瘫患者一定的成功愉悦感,提供了

患者主动进行康复治疗的动机,并在提高脑瘫患者认知功能和精细运动能力方面已被证明有一定的效果,这说明体感游戏可以作为辅助脑瘫患者治疗的一种手段。

2019 年, Farr William J 等人^[3]为了验证体感游戏对脑瘫儿童的运动康复是有效的,用 Nintendo Wii FitTM 进行为期 12 周 2 组的并行可行性试验。实验结果表明:体感游戏作为康复治疗的辅助治疗手段,是可行、安全且具有成本效益的。2017 年, Saleh^[4]等人采用机器人辅助虚拟现实(RAVR)康复训练和 RTP 训练计划的混合体,比较了两种干预措施的脑瘫患者引发的神经重组。Elangovan^[5]等人,证明了机器人辅助躯体感觉康复训练在脑瘫患者中的可行性;ÖZDİL^[6]研究了不同虚拟现实游戏应用于康复训练后,对伴有头晕和平衡问题的良性阵发性位置性眩晕(BPPV)患者的步态、反应时间、平衡功能、日常生活活动和生活质量的影响。

国外研究者还将体感游戏运用于脑瘫儿童上肢功能的改善方面:2016 年, Jane Elizabeth Sajan 等人^[7]评估互动视频游戏(IVG)与任天堂 Wii 补充常规治疗在脑瘫儿童康复方面的效果,选择 20 名脑瘫儿童,对照组和干预组各 10 名,干预组使用 Wii 的 IVG,作为常规疗法的补充;对照组患儿单独接受常规治疗。结果表明基于 Wii 的 IVG 可以作为 CP 儿童康复中常规疗法的有效补充。MATTIA^[8]验证了基于脑机接口(BCI)的干预对于患者在康复期间手部运动恢复的有效性。

国外研究者还在改善脑瘫患者下肢功能方面进行了尝试:El-Shamy 等人^[9]证实了体感游戏是改善双瘫患儿步态参数、平衡和跌倒风险的有用工具。PIA^[10]旨在研究验证将沉浸式虚拟现实(IVR)应用于康复领域的具体方案,用于在下肢外周损伤后恢复运动功能。

以上资料可以看出,体感游戏运用于康复领域这方面在国外得到了深入的研究,但在国内,体感游戏应用于康复领域的研究较少,且起步较晚。

2012 年 9 月,庞红^[11]利用体感互动游戏对脑瘫患者的运动障碍进行康复训练,将 50 名脑瘫患者随机平均分成对照组和观察组,对照组进行常规训练,观察组除常规训练之外增加了体感互动中位置觉和注意力训练,结果显示,训练体位意识和关注体感互动可以改善脑瘫患者的运动功能和平衡。

此后,2019 年,马颖等人^[12]为了确定体感游戏与引导式教育对脑瘫患者的康复训练的效果,选取了 74 名脑瘫患者,随机平均分成两组,参照组进行指导性训练,实验组在参照组的基础上结合运动游戏,比较两组康复效果的差异。结论证实体感游戏与引导式教育相结合对脑瘫患者康复效果有明显提高。

2022 年,汤艳等人^[13]探讨了巴士球结合体感 VR 游戏对脑瘫儿童康复以及其对粗大运

动技能、平衡功能和三维步态的空间-时间指数的影响。结果显示，球类结合体感 VR 游戏可以改善脑瘫儿童的粗大运动技能和平衡功能，降低被动状态下的肌张力，改善步态持续时间，缩短双足站立阶段的时间，这对脑瘫儿童进行日常活动的能力和家属的满意度有积极影响。

1.2.2 增强现实技术在体感游戏方面的研究现状

目前国内外对用于人机交互的增强现实技术的研究可以分为两类：一类是关于显示技术和跟踪注册算法的改进，另一类是关于增强现实环境中手势交互的应用。

土耳其的 Adem^[14]等人将 Leap Motion（一种非接触式传感器）与增强现实技术相结合设计了一个用于手部康复治疗的游戏系统。通过 Leap Motion 来识别人手，并将人手的实际位置与游戏里的虚拟场景结合，给人游戏的真实感。用户在创建的增强现实环境中进行手部屈伸练习，游戏的规则是在一定时间内到达迷宫的另一边，让用户在游玩的同时对手部进行训练，以此达到康复治疗的目的，康复迷宫游戏如图 1-1 所示。



图 1-1 康复迷宫游戏

Eva-Virtual Pet 是一个新的移动增强现实系统，由巴西的 Afonso 等人^[15]设计开发，允许用户用自己的手操纵程序生成的虚拟宠物。在同一位置，物体的大小和运动方向可以通过运动跟踪从虚拟世界镜像到现实世界。在增强现实环境中，这个系统可以实现表面映射，在现实世界中添加和放置虚拟物体。这种方法提高了注册的准确性，使物体在真实环境中被固定在一个稳定的位置。该系统可以识别徒手移动、旋转和 "喂" 宠物，如图 1-2 所示。



图 1-2 Eva-Virtual Pet 交互界面

虽然 AR 技术在国外被大量研究，但国内对 AR 技术的研究起步较晚，且在高校的研究

居多。

南京理工大学的施静^[16]设计了一个基于手势交互和 AR 技术的沙盘系统。该系统融合了多种传感器的手势交互方法,通过 AR 智能眼镜在 Hololens 平台上实现增强现实展示和手势交互,提高了电子沙盘手势交互的准确性。沙盘系统如图 1-3 所示。



图 1-3 手势交互沙盘系统

重庆大学的蔡小龙等^[17]设计了一套手势交互 AR 系统,该系统实现了增强现实版 flappy bird 游戏。利用手势交互方法,该系统连续预测实时三维动态手势和实时三维手部姿势,以执行游戏中的与鸟类交互任务,flappy bird 游戏如图 1-4 所示。

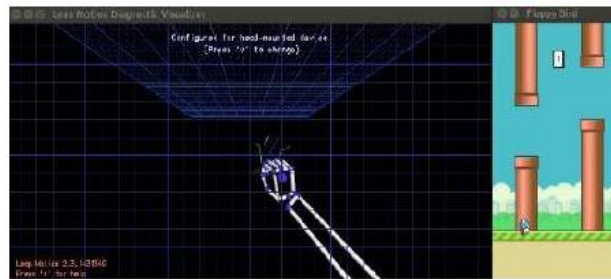


图 1-4 flappy bird 游戏

1.3 本章小结

通过对体感游戏、增强现实技术等相关的文献研究发现:国内外关于体感游戏用于脑瘫儿童身体康复的研究各有特点,但干预的总体效果是积极的,可以改善脑瘫儿童的运动功能。增强现实技术提高了体感游戏的技术舒适度,使得体感游戏不用佩戴价格高昂的辅助设备就能让患者进行简单的康复训练。所以,本课题打算运用增强现实技术来设计一款体感游戏,将其运用到脑瘫康复的领域中。

第二章 概念理论及策略研究

2.1 相关概念

2.1.1 脑瘫

脑性瘫痪（cerebral palsy, CP），简称脑瘫，是指由于各种原因造成的发育期胎儿或婴儿非进行性脑损伤，临床主要表现为运动发育和姿势异常，运动功能受限，是儿童时期常见的神经系统疾病之一，随着早产儿、低出生体重儿存活率的提高和围生期及新生儿重症监护技术的发展，脑瘫发病率在近年来逐渐上升^[18]。

小儿脑瘫和众所周知的智力障碍是不同的术语，现在很多人容易把它们混淆。脑瘫的主要症状是运动障碍，而智力障碍的主要症状是智力低下，主要原因是染色体异常。许多脑瘫儿童的学习能力很强，很多人都考上了好大学。在过去的两年中，有报道称脑瘫儿童丁某在北京大学学习，并最终进入了哈佛大学。

与此同时，不少脑瘫患儿存在上肢功能障碍，加强对脑瘫患儿上肢功能障碍的治疗和开发更有效的治疗方法，都对脑瘫患儿康复具有重要意义。在设计系统时，主要目的是降低脑瘫患儿其肌张力，并且改善其关节活动度，还应重视改善上肢的实际功能，促使其完成有动机、有目的的技能。

2.1.2 体感游戏

体感游戏（Motion Sensing Game），就是用身体去感受的电子游戏，突破传统的以连线手柄按键操作的游戏方式，是一种通过肢体动作变化来进行模拟操作的新型电子游戏^[19]。目前市面上的体感游戏机有多款，包括 Wii、Ps Move、Kinect、Xbox 360 Kinect 等。

2.1.3 增强现实技术

增强现实技术是一种将虚拟信息与现实世界相结合的技术。该技术包括多媒体、3D 建模、实时跟踪、注册和智能交互等，它的原理是把电脑中的虚拟信息，例如图像、3D 模型、视频等，模拟后在现实世界中进行应用^[20]。

增强现实是一项创新，它允许用户进入计算机模拟环境，无论该条件是当前现实的再现还是变出的宇宙。它可以相遇、感受和接触过去、现在和未来。它是我们自己创造的现实，我们自己定制的现实的媒介。它可以从制作电脑游戏到在宇宙中虚拟漫步，从漫步在我们自

己的幻想房子里，到在外来星球上漫步。增强现实一般是将虚拟信息与现实信息相互结合，达到了增强现实世界的效果。增强现实中的人机交互技术与智能显示技术和三维排列技术密不可分，并借鉴了人体工程学和认知心理学等学科。增强现实系统的常见交互技术通常包括手势交互技术、多媒体交互技术和触觉交互技术等。

(1) 手势交互技术。陈晓慈^[21]等人利用运动传感控制器 Leap motion 设计开发了一个基于手势交互技术的无人船控制系统。该系统使用 Leap Motion 双目传感器收集要操作的数据，计算机使用 MATLAB 软件设计算法来处理接收到的数据，将这些数据转换为无人船可以识别的电信号，然后将这些电信号发送到无线模块 NFR24L01，无人船码头解码无线模块 NFR24L01 与 Arduino 转换的信号,并输出相应的 PWM 波来控制无人船的动作。

(2) 多媒体交互技术。M A Rajasimha 介绍了多媒体交互技术的现状及其未来，然后简要概述了当前的多媒体交互应用，以及它们在存储和通信带宽方面的要求，以及对普遍标准化的需求。这些发展将为多媒体交互技术的未来发展提供动力^[22]。

(3) 触控交互技术。触摸互动是一种检测触摸屏表面存在一个或多个触摸点的技术。通过用手写笔或手指触摸屏幕，用户可以直接与显示的内容互动，并使用简单的手势进行输入。触控技术同时也跟我们的日常生活密不可分，例如触摸屏游戏、自助售货机、ATM 等。

2.2 理论基础

2.2.1 游戏化 MAT 模型

斯坦福大学的人类行为学福格(B.J.Fogg)教授在 2002 年提出了一个用户行为模型，如图 2-1 所示，将所有的行为（behavior）分解成三个要素：动机(Motivation)、能力(Ability)和触发器(Trigger)，即： $B=MAT$ ^[23]；

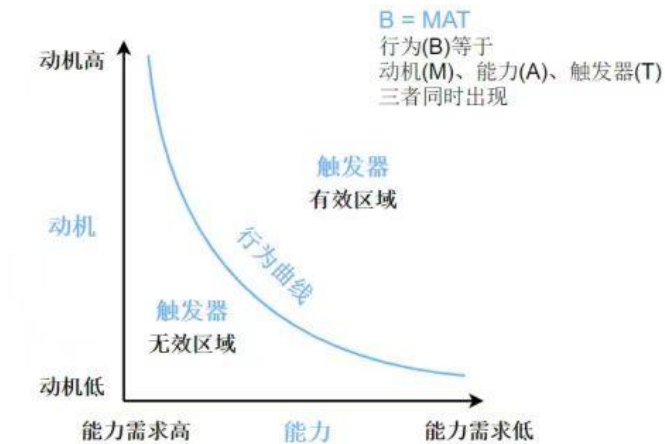


图 2-1 福格行为模型

2.2.2 沉浸理论

1975年由Csikszentmihalyi首次提出,理论对人们在日常生活中进行一些活动时为什么会全身心的投入,并忽略其他的相关感觉,进入沉浸的体验状态的现象,给出了定义^[24]。

随着科学技术的发展,沉浸理论被放在了人机互动领域进行了探讨。此时,沉浸理论也叫沉浸体验、沉浸式体验,指参与活动的人进入一种模式,意识被控制在小范围里面,其他与模式无关的感知觉都被屏蔽,只对模式中的目标和反馈有反应,还会产生控制环境的感觉。沉浸式体验是一种积极主动的心理体验,在这种体验中,个体在参与某项活动时会感到非常高興,因此有动力重复同样的活动而不感到厌烦。

沉浸式体验设计^[25]是一种基于沉浸式体验理论的设计方法,利用数字技术,调动用户的多种感官,通过实时、多感官、实物互动的体验,让用户沉浸在空间场景中,进一步影响用户的心理体验,达到更高的全身心沉浸效果。

2.3 策略研究

2.3.1 设计要素分析

本课题把4-8岁的脑瘫儿童定位成受众人群,由于我国特殊儿童基数较大,分布散,并且其认知能力不高,所以本课题主要对湖州市第一人民医院和第三人民医院脑瘫患者及相关家属和工作人员进行了采访调研。

脑瘫患者生理表现特征主要表现为运动障碍,例如做动作时不能根据自己的想法运动。脑瘫儿童在康复过程中,工作人员或家属普遍会比较注意其生理功能的恢复,从而忽略了他们心理情绪上的问题,但是患者在日常生活中的情绪会影响到康复过程的效率,例如排

斥参加康复训练等，并且如果不加以重视，则会影响到患者的整个成长过程。患者的心理表现特征：大多数患者有情绪或者行为上的异常，这种现象与脑功能受损有很大的联系，主要是海马体受损，表现方式主要为：任性、爱哭、性格上比较孤僻等。

本项目结合脑瘫儿童生理特征，重视其心理特征，在设计上不同于传统交互思维，通过更为童真童趣自然便捷的交互方式贴近脑瘫患者需求，提升交互的感知度。作为体感康复系统，本文主要对以下三个方面核心设计要点进行研究和分析：

（1）游戏体验的目的规划

体感康复系统目的产生是进行体感游戏行为的必要前提，一般游戏体验的目标分为浅层目的与深层目的。在体感游戏中，用户游戏体验的深层目的不同于常规体感游戏的娱乐性目的，在具有游戏化的体验同时还包含了运动锻炼的目的。而通过简单清晰的阶段性目标设计，使用户易于上手，产生完成浅层目标的作用力，在达成阶段性目标时，会给予用户游戏体验的满足感与成就感，用户就会持续使用，最终达到用户运动锻炼的长期需求的实现，促使用户不断实现阶段性目标是目的规划的关键重点。

（2）体感互动的行为设计

在康复系统中用户的行为主要包含两个方面：一方面是项目中游戏从开始到结束过程的具体操作游戏行为，即游戏整体流程——通过体感交互操作，获得相应的游戏反馈。另一方面是项目中的具体动作行为，通过体感交互与增强现实技术，使得用户的具体行为动作与游戏中的行为相对应。在具体动作行为的选择上，要依据用户的特征选择简单、易于操作、锻炼可行性的行为动作，同时在体感识别上要有相应的匹配性和容错性。

（3）交互体验的场景布局

体感游戏中的场景一般分为真实场景和虚拟场景。真实场景是真实世界里的，即用户使用游戏时的场地，往往在室内；虚拟场景是游戏的内部场景，由游戏界面和游戏声音构成。

游戏界面是主要画面的布局，包括游戏中的窗口、图标、按钮、文字、动效、声音等与游戏玩家接触的游戏元素。界面在游戏中的目的是相同的：在不影响游戏玩法的前提下，浏览重要的信息和状态。游戏声音包括游戏中所有的游戏背景音乐，是玩家最直接的听觉接触，同时是在听觉上产生交互的关键。游戏声音可以分为背景音乐和音效。在游戏的不同关卡中，背景音乐通常会随着界面的跳转而发生改变，主要起到烘托氛围的作用，在个别体感游戏中，还与体感交互行为的节奏相匹配；音效往往具备功能性，与玩家的游戏操作相关，比如得分时的鼓励音效。

2.3.2 体验模型构建

主要运用到上一节所提到的理论知识：游戏化 MAT 模型。

(1) 动机要素

心理学家爱德华·戴西认为行为的能量源泉就是动机，行为动机是驱动个体行为产生的内部原因，是一种激发和维持个体行为并指向某一目标的需要。在行为设计学领域，福格将行为的动机分为希望与恐惧、乐趣与痛苦、社会认同与拒绝三个层面^[26]。

(2) 能力要素

福格行为模型中的能力要素并不是为了让用户去学习全新的能力后才能使用产品，而是使用降低行为发生的难度的方式，间接提高用户能力。福格提出了时间、金钱、体力、脑力、社会偏差、反常规 6 个降低行为能力要求的要素。

(3) 触发要素

触发器包含火花、引导者和信号三个维度，“火花”起到激励的作用，通常适用于动机低、能力高的情况，例如限时折扣或抢先体验的广告；“引导者”降低了行为难度，适用于动机高、能力低的情况，例如打开软件后看到的引导；“信号”通常用来提醒用户实施行为，适用于动机能力都很高的情况，例如等待微信消息的人，通常听到提示音就会立刻打开微信。

由于触发要素中包含了动机和能力两方面，即动机和能力层面是福格行为模型的核心内容，因此，本研究中主要采用动机和能力两方面的要素来指导研究。

脑瘫患者进行康复训练的主要动机是被社会接纳，这是康复训练更深层的目的。而将康复训练设置成游戏，易于患者接受，而且在完成游戏时，会获得游戏成功时的愉悦感。这种愉悦开心，就是激励患者的动机。并且将游戏场景设计成可爱富有童趣的场景，考虑到了他们的内心心理需求，对于脑瘫儿童来说，是一种更容易接受的方式。

在能力方面，主要采用降低游戏的难度，来间接提高用户能力的方式。考虑到脑瘫儿童生理行为上的障碍，有些行为并不受控，当设置太繁琐的游戏时，患者完不成任务易产生挫败感，从而放弃游戏，放弃康复治疗。所以，可以将任务简化变成一个又一个小步骤，帮助用户不知不觉之间就积累了不少成功的经验，那么离下一个大的改变也就不远了。

结合游戏化 MAT 理论，构建的 AR 康复系统的体验模型如图 2-2 所示。

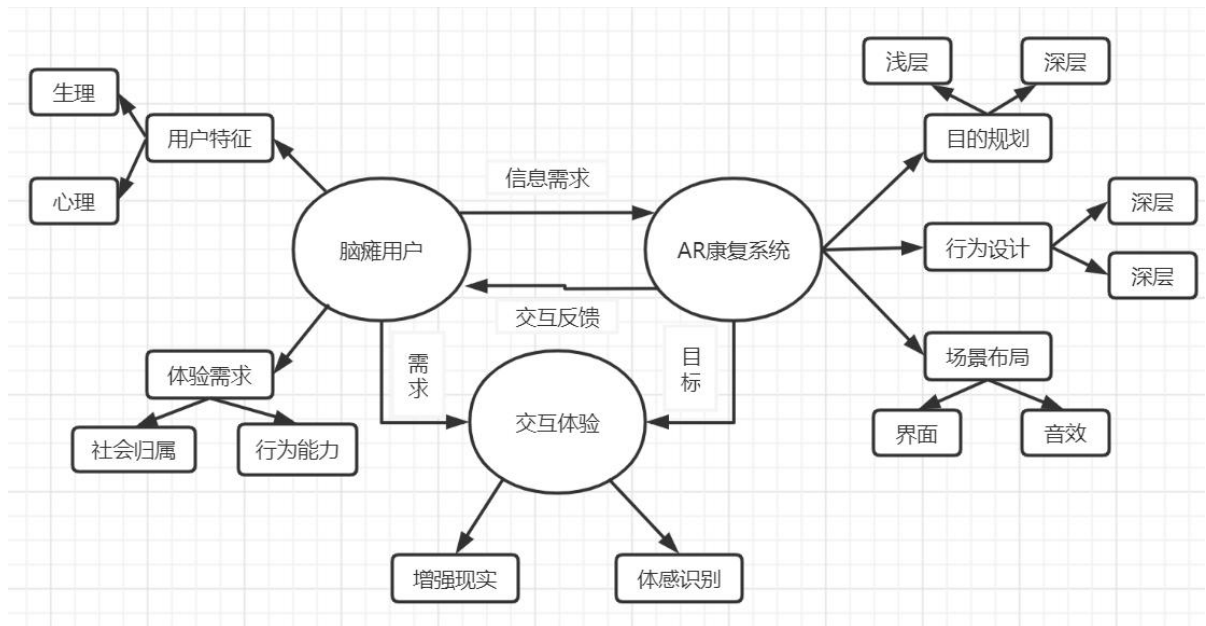


图 2-2 AR 康复系统的体验模型

在 AR 康复系统的体验模型中，脑瘫用户的用户特征主要是从心理和生理上进行分析：心理上会认为康复训练很难，从而在生理上排斥，这就降低了康复训练的效率。所以，在归纳体验需求时，需要从他们具体能做到的行为和具备的能力入手，提高他们的个人能力感，进而增强他们的社会归属感；在设计 AR 康复系统时，主要从三个方面进行了设计分析：目的规划、行为设计和场景布局，主要提升用户的行为控制感；在交互体验的设计上，主要采用的技术是增强现实技术与体感识别技术，通过这两个技术，来给予用户身临其境、更具沉浸化的体验。

第三章 基于 AR 的上肢康复训练系统设计

在上文中简单介绍了相关概念，并根据整理的患者需求，构建出了基本的设计模型，本章将对软件的功能设计及软件开发，以及各个模块的设计思路，做出详细论述。

3.1 系统开发环境

3.1.1 系统开发工具

(1) Unity

Unity 平台是一个完整的软件解决方案，用于在手机、平板电脑、个人电脑、游戏机、增强现实和虚拟现实设备等平台上创建、操作和交付任何实时的 2D 和 3D 互动内容。其优点^[27]总结如下：①兼容性强：Unity 3D 的编辑器可以在 Windows、Mac 和 Linux 等多种系统上运行；②免费性：Unity 3D 的 Unity 专业版和 Unity IOS 专业版可免费提供给个人和企业；③系统交互良好：Unity 有非常实用的界面设计插件，可以瞬间改变界面窗口，实现快速互动，为玩家提供优秀的游戏体验效果；④资源导入便捷：Unity 3D 支持从许多软件格式导入模型，包括 3ds Max、Maya 和 Blender，以及音频、视频、动画和图像；

(2) Visual Studio

Micro Visual Studio 是一个集成开发环境（IDE）和一套开发工具，用于创建 Windows 应用程序、XML Web Services、移动应用程序和 ASP.NET Web 应用程序^[28]。Visual Studio 通常用于创建应用程序，创建一个应用程序的七个基本步骤：1）开发应用程序；2）创建应用程序的用户界面；3）定义用户界面对象属性；4）编写代码以实现程序的功能；5）测试和调试应用程序；6）生成可执行文件；7）为应用程序创建安装程序。

(3) TensorFlow Lite

TensorFlow Lite 是一个工具包，允许开发人员在移动、嵌入式和 IoT 设备上运行模型，并实现设备端机器学习。其主要特点：

①它考虑到了五个方面的限制：延迟（不需要向服务器传输数据），隐私（不需要设备上的个人数据），连接性（不需要互联网连接），大小（小的模型和二进制文件大小）和功耗（高效推理和不需要网络连接），为设备端机器学习进行优化。

②对安卓和 iOS 设备、嵌入式 Linux 和微控制器的跨平台支持。

③支持多种语言，包括 Java、Swift、Objective-C、C++ 和 Python。

④通过硬件加速和模型优化支持实现高性能。

⑤跨越多个平台的常见机器学习任务的例子，包括图像分类、物体识别、估计、问题回答和文本分类。

3.1.2 系统环境配置

在对系统进行开发之前，首先需要对 Unity、Visual Studio 以及 TensorFlow Lite 等工具进行环境配置：

(1) 首先到 Unity 官网注册账号，Unity Hub 完成下载后，正常登录自己的 ID，申请个人版本的许可证，一般为 7 天，然后下载相应的编辑器。本项目主要采用的编辑器是 Unity2021.3.4f1c1，在初次下载时，可不用为其添加模块，具体操作如图 3-1 所示。

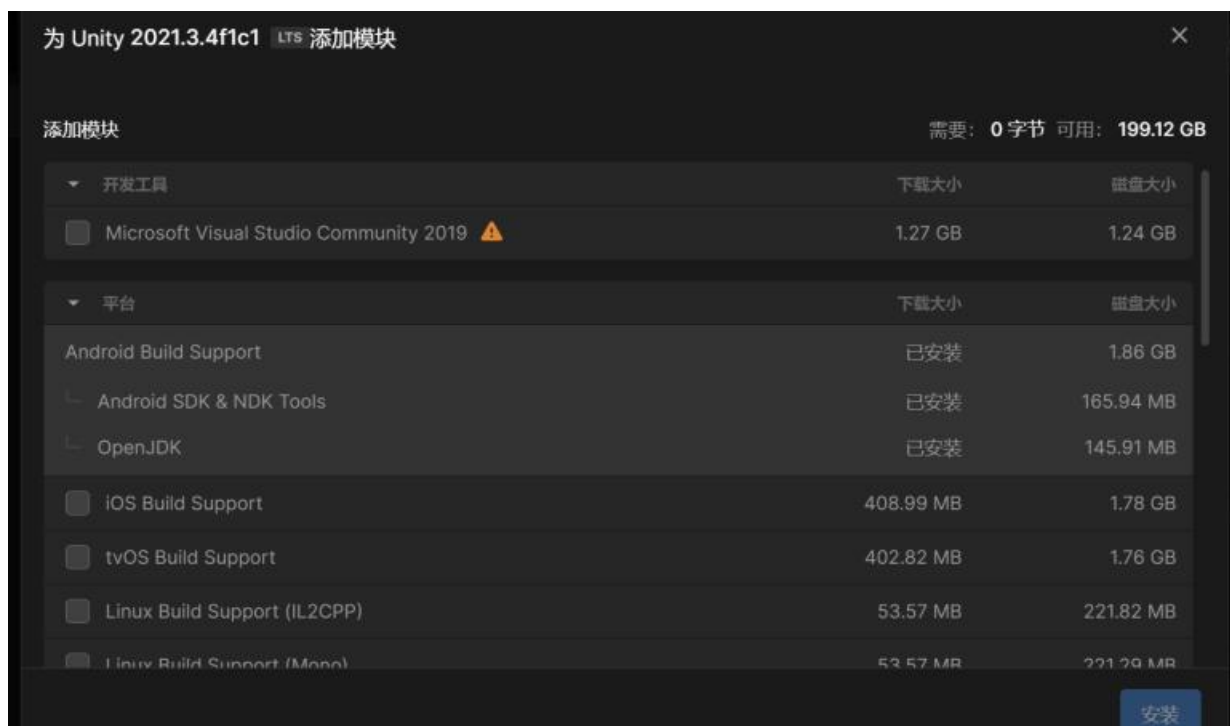


图 3-1 编译器的配置

(2) 到 Visual studio 官网完成下载后，在游戏开发模块中勾选使用 Unity，以完成和 unity 的连接；还需勾选桌面应用和移动应用选项中的.NET 桌面开发，以便使用 C#语言进行游戏脚本的开发；

(3) 构建 TensorFlow Lite 库：先使用 Git-LFS 下载 TensorFlow Lite for Unity 储存库，并构建最新的 TFLite，然后在 TensorFlow 库中运行 ./configure，最后运行 (Python3) 为每个平台构建 ./build_tflite.py 文件。

3.2 系统功能设计及开发

3.2.1 系统功能设计

体感康复系统通过结合增强现实技术帮助患者改善手部运动功能的障碍。本系统适用于手部功能损失较轻患者。此外，该系统经济成本低，操作十分简单，实用性较高。本文主要设计了“摘星星”康复训练项目：该游戏通过识别手部姿态，使患者伸手触碰到场景中随机生成的虚拟“小星星”，即算完成任务。该游戏训练时长为一分三十秒，每颗“星星”出现的时间是五秒，每次出现一颗星星。

3.2.2 系统结构设计

基于 AR 的康复系统结构如图 3-2 所示，将增强现实技术与体感识别相结合，设计了一个康复训练项目：摘星星游戏。摘星星游戏旨在强化轻度脑瘫患者对上肢的控制能力以及提供患者主动进行训练的目的。

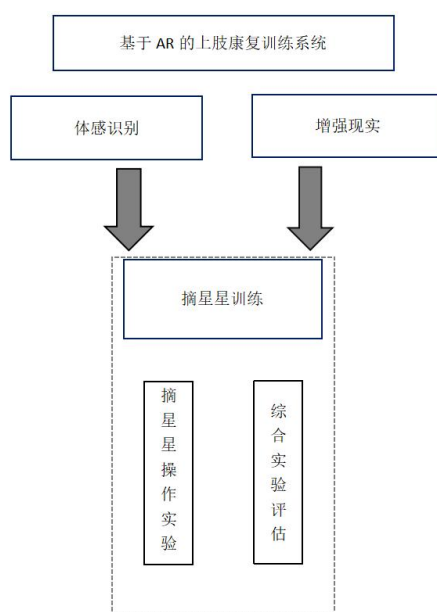


图 3-2 AR 康复系统框架图

3.3 系统功能开发

体感康复训练系统适用于轻度脑瘫患者手功能的康复训练，通过将计算机产生的虚拟对象叠加到真实场景中，结合 BlazePose 算法，对患者手部进行定位与追踪，并将虚拟物体的坐标进行转换，从而在真实场景中和虚拟对象产生交互，即患者可以在真实场景中看到并且触摸到动态虚拟对象，使患者对真实世界的体验更深入了。

在系统开发之前，首先需要确定设计目标和用户受众，本研究将受众人群定位于 4-8 岁

的脑瘫儿童，通过模拟“摘星星”的过程，让他们获得喜悦感，从而乐于参加康复训练，而通过多次的康复训练，其身体上肢功能会得到很大的改善。在明确了目标和受众后，制定了主要的设计内容和思路：①对游戏主场景进行搭建；②为游戏编写相应的脚本；③添加虚拟游戏对象，整合成预制件，添加脚本代码控制，并完成 Collider（碰撞体）的设置；④加入相机，实现对用户的实时监测位置和更新；⑤游戏打包发布。

3.3.1 BlazePose 算法

BlazePose 是一种人体姿势估计的轻量级的卷积神经网络架构^[29]，用于在移动设备上上进行实时推理。在推理过程中，该网络为单人产生 32 个人体关键点，并在 Pixel 2 手机上以每秒 30 帧的速度运行。因此，该系列算法方便了对运行速度比较高的 AR/VR 开发者使用。所以，它特别适合如健身跟踪和手语识别之类的实时用例。在 Pixel 3 上 GPU 运行，BlazePose 可以达到 112 FPS(frames per second)。在本项目中，主要调用了 Visual Studio 中 TensorFlow Lite 库，实现了视觉姿态检测功能，并对姿势关键点进行检测。BlazePose 算法设置的 32 个人体关键点如图 3-3 所示。

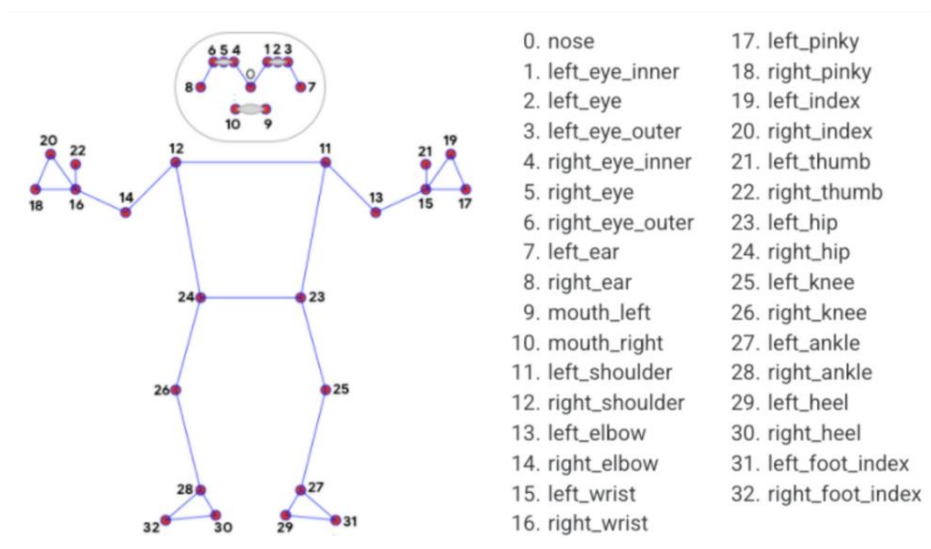


图 3-3 人体关键点

3.3.2 系统开发的具体步骤

(1) 导入 BlazePose 与 StreamingAssets 任务包，识别人体姿势并将姿势坐标实时反馈到相机中，实现对手部关键点的识别与追踪，并将坐标转换都转换成世界坐标，绘制到屏幕

上;

(2) 使用 Unity 创建虚拟游戏场景, 游戏场景主要包含声音系统和水平光线的照射, 创建的游戏场景如图 3-4 所示。

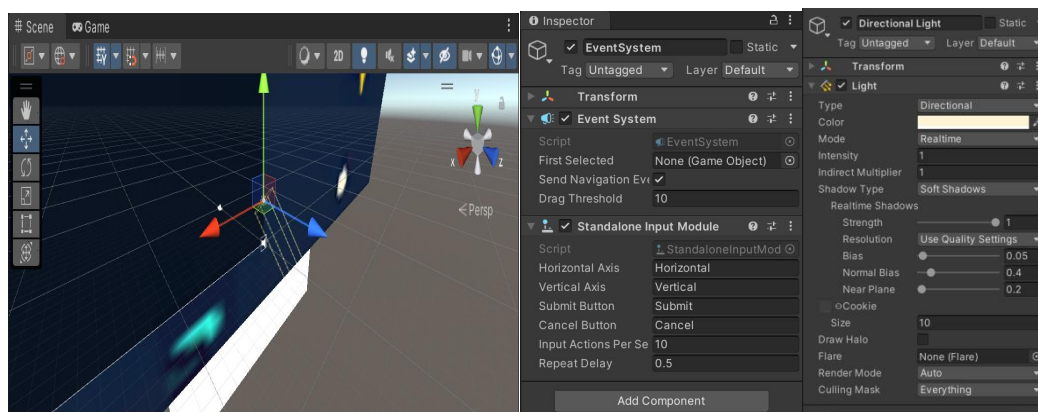


图 3-4 游戏场景的创建及相应的设置

(3) 使用 Visual Studio 为游戏对象编写并添加相应的脚本: 包含了点击物体脚本、动作识别脚本、特效声音脚本、系统脚本等;

(4) 制作相关的预制件 (prefab), 本项目主要制作了三个预制件, 分别与五角星、分数和声音特效有关。除了已经编写好的脚本分别与它们链接后, 五角星还需要另外添加碰撞体的脚本, 五角星的预制件设置如图 3-5 所示;



图 3-5 预制件设置

3.3.3 交互功能的实现

(1) dzsbkj 插件: “动作识别控件”, 结合 Unity 相机对人体姿态骨骼进行检测与实时位置更新, 并将其检测结果得出的坐标转换成世界坐标系, 绘制到屏幕上。在添加到 BlazePose 游戏对象时, 分别与 mediapipe 中相应的 detection 和 landmark 关联, 具体操作如图 3-6 所示。

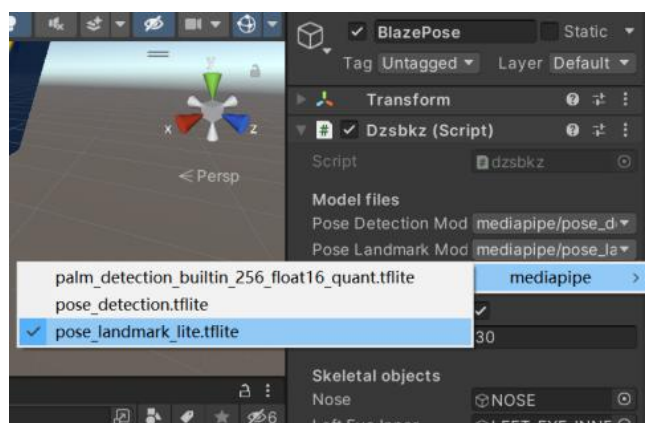


图 3-6 BlazePose 对象设置

(2) xt 脚本: “系统脚本”, 用于控制游戏的各种状态和响应玩家操作, 主要完善了游戏的基础功能, 例如设置游戏时长、暂停游戏、播放音效等。在与 xt 对象链接时, xt 对象还要与相应的预制件链接, 同时匹配相应的音效。xt 对象具体设置如图 3-7 所示。

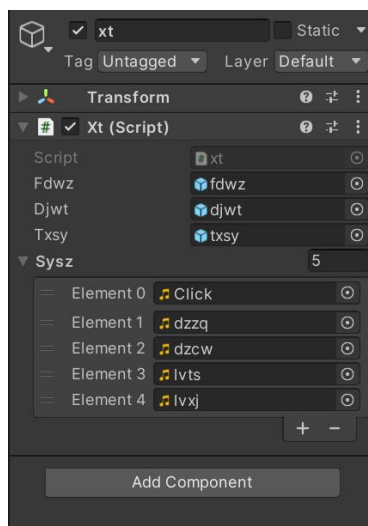


图 3-7 xt 对象设置

(3) wjkz 脚本: 主要功能更改虚拟物体“五角星”的坐标, 将其世界坐标转换成屏幕坐标, 从而实现在屏幕上看到五角星; 具体代码如图 3-8 所示。

```

//获取当前游戏对象的位置，并将其坐标转换成为屏幕坐标
Vector2 pmzb = Camera.main.WorldToScreenPoint(transform.position);
//检测以屏幕坐标为中心半径为10的周围的碰撞体
Collider2D pzwt = Physics2D.OverlapCircle(pmzb, 10);

```

图 3-8 更改虚拟物体的坐标

如果检测到碰撞，则五角星消失，随即出现分数+1 的提示，具体代码如图 3-9 所示。

```

public void fsgx(int fs, Vector3 wz) //分数更新
{
    yxjm.fsgx(fs);
    fdwzgz f = Instantiate(fdwz, wz, Quaternion.identity, yxjm.transform).GetComponent<fdwzgz>();
    f.csh(fs);
}

```

实例化放大文字

图 3-9 更新分数

3.3.4 游戏的打包

先为游戏的编译器添加安卓 Build 的模块，然后设置 Player Setting 里的发布设置：要求设置 Bundle Identifier，其他的选项可以不用设置，最后点击 Build 输出选项，设置文件名选择相应的存储路径即可。然后打开手机的开发者模式，将生成的 apk 项目安装到手机里面，进行相关调试，调试成功即可使用。

3.4 系统界面原型设计

游戏开始界面：采用儿童所熟知的动画形象——熊二为背景，并且整体界面颜色偏暗，符合“黑夜”的特点，更贴合摘星星的主题，游戏开始界面如图 3-10 所示。游戏开始后，整体过程中都会有愉悦、带有节奏性的背景音乐。



图 3-10 游戏开始界面

游戏主场景由游戏左上方玩家的分值、右上方的游戏时间倒计时、游戏中间玩家动作识别范围以及游戏右下方的暂停键组成，如图 3-11 所示。在游戏中心区，玩家动作识别范围内，还有辅助玩家角色——“五角星”，不定时出现在识别范围内，且表面设计了出现时间倒计时，倒计时 5 秒。如果玩家在 5 秒内触碰不到，星星就会消失，随即又会在识别范围内的任意地方出现；如果玩家五秒内触碰到，星星消失随即出现“+1”的提示，即游戏总分值+1。

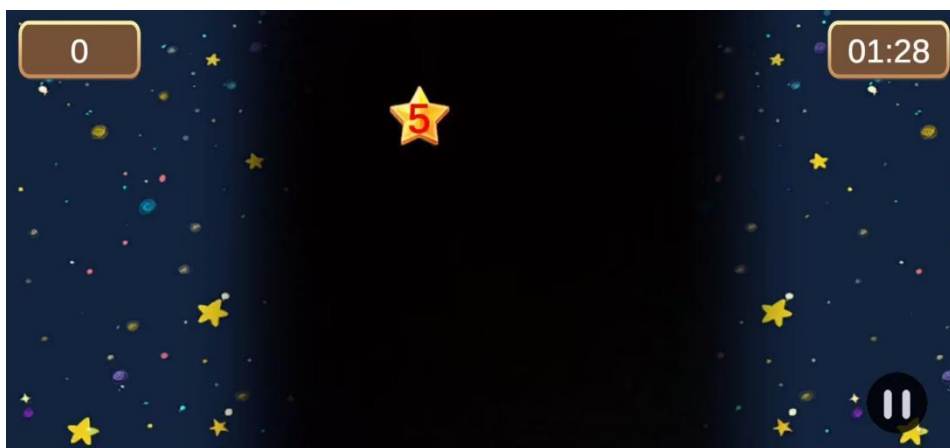


图 3-11 游戏主场景

当用户在游戏过程中，偶尔会出现错误操作或者试探性尝试，这是无法避免的。因此，可以通过设计“暂停弹窗”来解决这种错误操作的情况。根据游戏过程中，可能出现的几种情况，例如并不想开始游戏，错误开启了游戏关卡、游戏过程中想去上厕所等，设计了三种解决方案，供用户选择：返回游戏、回到主页、退出游戏。这可以有效解决用户在游戏过程中出现的异常情况，增加了对游戏体验的愉悦感。游戏暂停界面如图 3-12 所示。



图 3-12 暂停界面

当用户完成一场训练后，系统会对触碰到的星星进行统计，从而形成了得分界面。得分结算界面包含分数和再来一局按钮，分数越高，用户会产生一定的愉悦感，并会进行下一次

的康复训练；但如果第一次训练分数太低，只要下次分数有进步，用户会感到被激励，同时会进行不断反复的练习，这促成了脑瘫患者主动进行康复训练的动机。游戏得分结算界面如图 3-13 所示。



图 3-13 得分结算界面

第四章 基于 AR 的上肢康复训练系统实现

本章主要对基于 AR 的上肢康复训练系统的项目做了简单介绍，并通过邀请学生参加实验的方式，来验证本项目的可行性。

4.1 摘星星训练

4.1.1 训练模式

本项目的设计思路来源于游戏接方块，与增强现实技术相结合，将方块改成五角星，使其更具童真趣味性。通过对用户手部的识别与追踪，用户伸手触碰到虚拟场景中随机生成的“五角星”，即加一分。训练时长为一分三十秒，训练结束会出现一个最终得分；最终得分可作为康复训练效果的参考。该项目主要改善患者对手运动的控制能力、增强患者双臂运动的力量以及对其他方面都具有良好的改善效果。测试过程如图 4-1、图 4-2 所示。



图 4-1 用户触碰到“五角星”



图 4-2 触碰到“五角星”加一分

4.1.2 测试模式

将手机置于桌面上,间隔距离约为一米,这样手机的摄像头就可以拍下使用者的上半身,然后拍摄记录实验过程。由于笔者能力有限,并未联系到真正的脑瘫儿童患者,所以笔者邀请了 25 位同学参加本次项目的“摘星星”实验。每位同学都完成了五次训练,在五次训练结束后计算并记录平均得分。训练结束后,他们被要求根据四个方面对训练进行 10 分制评分:趣味性、交互性、训练难度以及理解难度。

4.2 可行性分析

本章的上一节详细描述了“摘星星”项目的训练和测试模式。在这一节中,主要分析 25 名学生的平均每次训练得分以及问卷打分,以测试这个训练项目的可行性。

共有 25 名学生被邀请参加这个实验,他们的主导手是右手。几乎所有的学生都不熟悉增强现实和体感交互技术,因此在正式开始测试之前,他们花了不同的时间来熟悉体感训练和康复系统。在测试结束时,每位学生都被要求完成一份单独的调查问卷,以评估训练的有效性和他们对康复方案的实际体验。本文选择了四个方面来反映对该方案的体验:趣味性、交互性、训练难度以及理解难度。实验结果以图 4-3 和图 4-4 的形式展现出来。

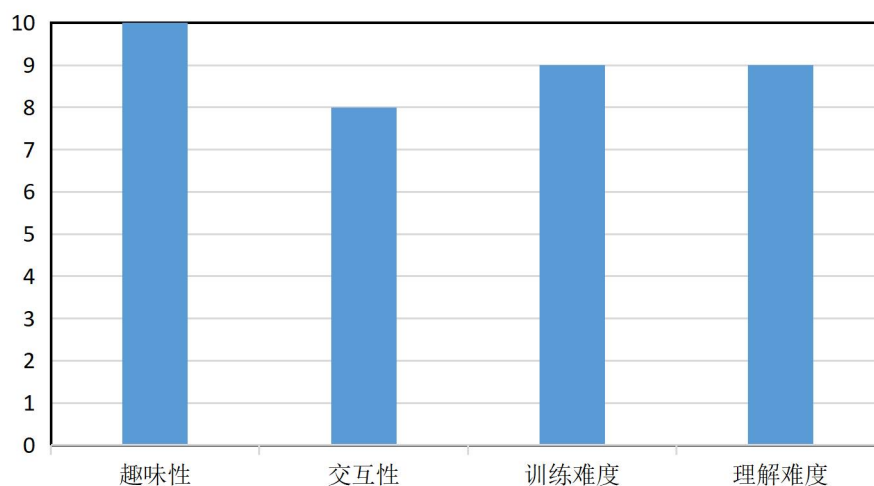


图 4-3 体验效果统计结果

通过图 4-3 可以看出,该实验的交互性较差,根据采访得知是偶尔会出现识别不到的情况,但其趣味性普遍得到了实验参与者的认可;由于该实验只需要触碰到五角星就可完成任务,所以训练并不复杂;而经过测试前对参与者讲解游戏规则,参与者很快就明白了游戏规则以及他们对理解难度的打分来看,本游戏易于理解。在刚了解到游戏规则时,参与者纷纷表示间接实现了他们小时候的摘星星梦想,而且游戏设计界面十分具有童真,在触碰到星星时,还有响应的触碰特效以及声音效果,参加实验者普遍认为适用于儿童群体。

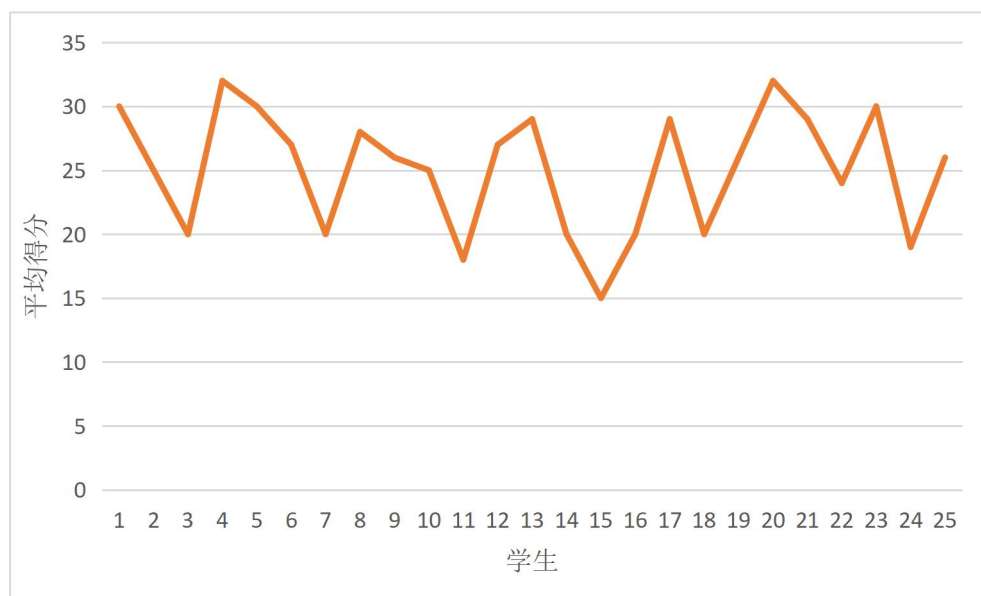


图 4-4 训练统计结果

通过图 4-4 可以看出，由于训练比较简单，大多数参与者获得了比较好的成绩，但仍有少部分参与者得分偏低。

通过实验过程可以看出，本文提出的基于增强现实技术的康复系统相对于传统的康复系统来说操作具有较高的理解性和趣味性，并且不需要购买佩戴额外的辅助设备器材，减少了经济成本。本项目的运动方式是通过屏幕上不定时出现的五角星来引导脑瘫患者上肢运动，与真实场景相结合，给予用户更具情景化的体验。游戏结束后会出现得分界面，通过可视化数据的方式展现用户锻炼的成效，提升用户的成就感，并促进下一次康复训练的发生。用户必要时需双手进行运动才完成任务。

脑瘫儿童主动进行康复训练的积极性较低，往往是在康复人员或者家属的监督下，才会参与康复训练。而本游戏的得分恰恰提供了这个主动参与训练的积极性，将被动训练转化成主动训练，激发了患者对于康复训练的兴趣，以此达到训练的效果，长期使用，还会加强他们对上肢的控制能力。该项目主要改善患者对手运动的控制能力、增强患者双臂运动的力量以及对其他方面都具有良好的改善效果。

本项目主要提供了脑瘫儿童进行康复训练的动机，而且结果表现直观，也说明产品设计达到了预期，证明了方案的可行性。但实验中也存在一些不足之处，例如实验样本过少，训练项目有限等。此外用户在多次使用该康复系统后容易出现厌恶感，会降低康复效果。

第五章 总结与展望

5.1 总结

增强现实技术几年来被广泛运用于各个领域,与体感识别相结合能够以更加人性化的方式解决问题。本课题以此为背景,将增强现实技术与体感交互引入到轻型脑瘫儿童的康复训练中,旨在通过游戏的方式介入脑瘫患者康复训练当中,提升训练体验,提高训练效率,本课题主要结论包括:

1. 以福格行为模型理论为基础,通过文献调查、行为观察等方式进行调研与分析,得到脑瘫儿童行为动作心理特点,以此确定用户训练行为中的动机影响因素,然后根据福格行为模型所得出的用户需求,以此为基础为康复系统的设计提供策略方向。
2. 使用 Unity 开发了“摘星星”项目,完成了具体的游戏设计与制作,实现了一款简单的体感游戏,包括游戏动画和 UI 等基本部分;
3. 遵循体感交互体验要素和交互体验设计策略,构建适用于脑瘫儿童群体的体感游戏交互原型,并对其进行测试和可行性评估,该原型通过可行性评估,初步验证了增强现实技术运用于此次设计实践当中的可行性,取得良好反馈。

5.2 展望

论文撰写过程中,受技术条件、时间与成本等原因,本文所做的研究工作仍然处于基础性阶段,未来将从以下三个方面进行进一步的研究与探索:

1. 设计的康复训练游戏项目只有一个,今后应该补充设计更多更有趣的体验项目;
2. 实验样本不足,验证基数较小,缺少脑瘫患者训练真实的数据,后续在实验时应寻找真正的脑瘫患者参与;
3. 未具备评估患者训练效果的系统,今后应添加患者训练评估系统,以便更好的应用于医疗康复训练中,促使医护人员根据结果得到更好的训练方案。

参考文献

- [1] 封玉霞,庞伟,李鑫,杨顺波,刘师宇,卢淑卿.中国 0~6 岁儿童脑瘫患病率的 Meta 分析[J].中国全科医学,2021,24(05):603-607.
- [2] 钱怡. 体感游戏在脑瘫学生上肢功能康复中的应用研究[D]. 华东师范大学,2021.DOI:10.27149/d.cnki.ghdsu.2021.000584.
- [3] Farr William J,Green Dido,Bremner Stephen,Male Ian,Gage Heather,Bailey Sarah,Speller Sandra,Colville Valerie,Jackson Mandy,Memon Anjum,Morris Christopher. Feasibility of a randomised controlled trial to evaluate home-based virtual reality therapy in children with cerebral palsy.[J]. Disability and rehabilitation,2019.
- [4] Soha Saleh; Gerard Fluet; Qinyin Qiu; Alma Merians; Sergei V Adamovich; Eugene Tunik; "Neural Patterns Of Reorganization After Intensive Robot-Assisted Virtual Reality Therapy And Repetitive Task Practice In Patients With Chronic Stroke", FRONTIERS IN NEUROLOGY, 2017. (IF: 3)
- [5] Naveen Elangovan; I-Ling Yeh; Jessica Holst-Wolf; Jurgen Konczak; "A Robot-assisted Sensorimotor Training Program Can Improve Proprioception And Motor Function In Stroke Survivors", IEEE ... INTERNATIONAL CONFERENCE ON REHABILITATION ..., 2019.
- [6] AYTÜL ÖZDİL; "2-dimensional Versus 3-dimensional Virtual Reality Game Training in Individuals With Benign Paroxysmal Positional Vertigo: A Randomized Controlled Study", 2021. (IF: 2)
- [7] Jane Elizabeth Sajan,Judy Ann John,Pearlin Grace,Sneha Sara Sabu,George Tharion. Wii-based interactive video games as a supplement to conventional therapy for rehabilitation of children with cerebral palsy: A pilot, randomized controlled trial[J]. Developmental Neurorehabilitation,2016,20(6).
- [8] DONATELLA MATTIA; "DiSCloser: Unlocking Recovery Potential of Arm Sensorimotor Functions After Spinal Cord Injury By Promoting Activity-dependent Brain Plasticity and Modeling The Causal Relationship Between Brain Plasticity and Recovery of Function", 2022. (IF: 2)

- [9] El-Shamy Shamekh Mohamed. Effects of Antigravity Treadmill Training on Gait, Balance, and Fall Risk in Children With Diplegic Cerebral Palsy.[J]. American journal of physical medicine & rehabilitation,2017,96(11).
- [10] LORENZO PIA; "Immersive Virtual Reality in The Rehabilitation of Peripheral Injuries", 2023. (IF: 2)
- [11] 庞红. 体感互动游戏在脑瘫运动疗法中的应用[C]//中国康复研究中心.第七届北京国际康复论坛论文集(下册).[出版者不详],2012:2.
- [12] 马颖,王晓铃,肖玉华.体感游戏联合引导式教育对脑瘫患者康复效果的影响研究[J].世界最新医学信息文摘,2019,19(07):193.DOI:10.19613/j.cnki.1671-3141.2019.07.146.
- [13] 汤艳,徐军,洪永锋.巴士球联合 VR 体感游戏在脑瘫患儿康复中的应用效果[J].蚌埠医学院学报,2022,47(07):870-875.DOI:10.13898/j.cnki.issn.1000-2200.2022.07.007.
- [14] Hacıoğlu A, Özdemir Ö F, Şahin A K, et al. Augmented reality based wrist rehabilitation system[C]//2016 24th Signal Processing and Communication Application Conference (SIU). IEEE, 2016: 1869-1872.
- [15] Costa A, Lima R, Tamayo S. Eva, um mascote virtual em Realidade Aumentada[C]//Anais Estendidos do XXI Simpósio de Realidade Virtual e Aumentada. SBC, 2019: 41-42.
- [16] 施静. 增强现实电子沙盘的手势交互技术研究[D]. 南京理工大学,2019.DOI:10.27241/d.cnki.gnjgu.2019.000482.
- [17] 蔡小龙. 增强现实中的手势交互系统研究与设计[D].重庆大学,2018.
- [18] 郭灿. 脑瘫儿童睡眠问题特点及其影响因素的研究[D]. 青岛大学,2021.DOI:10.27262/d.cnki.gqdau.2021.000741.
- [19] 刘昉,史国生.体感游戏对青少年体育锻炼行为促进作用的研究[J].体育科技文献通报,2013,21(05):26-28.
- [20] 卞方舟. 基于增强现实的人手自然交互康复系统设计[D].南京信息工程大学,2022.DOI:10.27248/d.cnki.gnjqc.2022.000875.
- [21] Xiaoci Chen,Shuyi Du,Xu Yang,Qinwen Li,Yuxiang Ma. Unmanned Boat Control System based on Gesture Interaction Technology[J]. Journal of Artificial Intelligence Practice,2021,4(2).
- [22] M A Rajasimha. A Perspective on Multimedia Technology[J]. IETE Technical

Review,2015,10(6).

- [23] 王轶慧.基于福格行为模型的移动社交产品设计研究[J].科技创新与应用.2018,08:5-9.
- [24] Csikszentmihalyi,M.Beyond Boredom and Anxiety[M].San Francisco:Jossey-Bass Publishers,1975.
- [25] 任梅.民间艺术展览馆沉浸式体验设计研究[D].齐鲁工业大学,2021.DOI:10.27278/d.cnki.gsdqc.2021.000170.
- [26] 李宁.基于福格行为模型的儿童消防教育游戏化学习体验设计研究[D].浙江理工大学,2022.DOI:10.27786/d.cnki.gzjlg.2022.000028.
- [27] 魏晓菲.基于 Unity 3D 的计算思维教育游戏的设计与开发[D].江西科技师范大学,2022.DOI:10.27751/d.cnki.gjxkj.2022.000196.
- [28] 曹明君.基于 Visual Studio 与 Python 平台开发有限元分析结果自动后处理系统[D].青岛理工大学,2015.
- [29] 吕松杰,祁宇明,邓三鹏等.基于 3D 骨骼点数据的人体动作识别算法研究[J].装备制造技术,2022,No.335(11):9-11+30.

致谢

转眼间，四年的校园生活就这样结束了。行文至此，我要感谢众多老师、朋友和家人对我的期望和鼓励。此时此刻，我无法用语言来表达我发自内心的感激之情。

首先衷心感谢我的导师王泽峰教授，在课题的选择上给我给予帮助，帮我规划整个设计思路。在我的课题设计中，给我提出了很多理论指导，帮我找到了正确的设计方向。同时还要感谢辅导导师胡连信老师，论文初期的时候给出了许多的修改意见，对论文要求精益求精。在此，对两位导师致以最崇高的谢意！

其次还要感谢实验室研究生谢广东师兄，在软件设计部分，帮我解决了一些设计部分的技术问题，让我更好地完成了设计部分。

同时我还要感谢我的同学室友们，尤其是跟我选择同一个导师的小组成员。曾经一起开会讨论课题的时光还历历在目，那将是最难忘的时刻之一。

最后，我要感谢我的父母，感谢他们多年来对我的默默支持、理解、信任和期望，这激励着我继续前进。

还要感谢论文评阅组和答辩组的老师们，感谢百忙之中阅读我的论文。

路漫漫其修远兮，吾将上下而求索。这是我最喜欢的句子，就用这话作为这篇论文的一个结尾，也是一段生活的结束。期望自我能够继续少年时的梦想，永不放下。我会在以后的学习和生活中，秉持初心，做得更好。