

# 基于数字建构的 AR 现实交互听障辅助系统设计研究

徐旻培, 李嘉树

(南京艺术学院, 南京 210013)

**摘要:** **目的** 以提升听障患者生活质量为目标, 尝试在增强现实交互技术的帮助下以视觉上的扩展来弥补听障缺陷, 并将数字建构产品作为最终物态进行呈现。**方法** 以数字建构的设计方法与增强现实的技术路径为指导, 针对听障患者的具体需求展开探讨, 研究了数字建构下增强现实交互听障系统深度开发的可能性, 为后续设计提供了思路并最终得出方案。**结论** 随着计算机硬件计算速度的提升, 计算机处理多任务的能力更为出色, 增强现实交互技术得以通过连接设备, 将虚拟世界投射到现实世界中。利用此特性, 以数字建构的方式集成智能设备, 有助于弥补人体的多种生理缺陷, 为残障人士建立与外界正常沟通的介质, 具有重要的理论与实践意义。

**关键词:** 数字建构; 听障群体; 增强现实; 辅助系统

**中图分类号:** TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2023)02-0404-07

**DOI:** 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.02.049

## Design of an AR Realistic Interactive Hearing Aid System Based on Digital Construction

XU Min-pei, LI Jia-shu

(Nanjing University of the Arts, Nanjing 210013, China)

**ABSTRACT:** The work aims to improve the life quality of people with hearing impairment by attempting to compensate for the hearing impairment with the help of augmented reality interaction technology and visually expanding and presenting digitally constructed products as the final object. With the design method of digital construction and the technology path of augmented reality as a guide, the possibility of developing an augmented reality interactive system for the hearing impaired with the help of digital construction was explored, ideas for the subsequent design were provided and a solution was finally obtained. With the increase in computing speed of computer hardware and the ability of computers to handle multitasking and workflow, augmented reality interaction technology allows for the projection of virtual worlds into the real world through connected devices. Using this feature to integrate smart devices in a digitally constructed way is of great theoretical and practical importance, as it can help to compensate for the many physiological deficiencies of the human body and establish a medium for normal communication with the outside world for people with disabilities.

**KEY WORDS:** digital construction; hearing impaired groups; augmented reality; aid system

据第二次全国残疾人抽样调查显示,我国残疾人口总数约为 8 500 万人。其中,听觉障碍人群高达 2 780 万,约占残疾人总数的 32%,位居残疾人总数的首位<sup>[1]</sup>。然而,大多数听障人士仍然由于出行不便、交流不畅等问题难以融入社会。面向如此庞大的视障群体,对于听障辅助设备的创新亟须得到推进。在如

今助听设备同质化的背景下,基于数字建构的交互听障辅助系统凭借增强现实的技术手段,帮助视障人群以多感官的扩展来弥补听觉缺陷,为助听设备的发展提供了新的思路。

本文基于对数字建构与增强现实技术的具体论述,根据听障患者的具体需求,提出了数字建构下

收稿日期: 2022-09-12

作者简介: 徐旻培(1979—),男,博士,讲师,主要从事建筑学与创新设计方面的研究。

通信作者: 李嘉树(1999—),男,硕士生,主攻创新设计。

AR 现实交互系统在听障患者中的应用预想, 在探讨了听障辅助系统设计的可能性后, 总结出数字建构下 AR 听障辅助交互系统的设计原则与技术路径, 最后在此基础上进行了设计实践, 以期满足听障人群的实际生活需求。

## 1 数字建构与增强现实概述

### 1.1 数字建构

“数字建构”最早指的是在建筑生产过程中使用物质或非物质的数字技术进行建筑设计及建造。其中, 非物质数字技术包括创造性地使用脚本、编程和参数化模型软件, 而物质数字技术包括创造性地使用数字建造技术, 例如数控切削、3D 打印和激光切割等<sup>[2]</sup>。随着相关研究的深入与数字技术的不断创新, 如今数字建构的语义已拓展至整个设计领域, 其特征与优势也开始呈现于不同类别的设计实践之中。

徐卫国<sup>[3]</sup>对数字建构进行了较为全面的定义, 其认为数字建构是以生成形体的内部逻辑系统作为构造的基础逻辑, 并依靠软件技术与数控设备进行建构与加工的设计方法<sup>[4]</sup>。根据这一定义, 数字建构得以被引入更为微观的产品设计领域之中。相较于传统的设计方式, 数字建构在数据计算、拟态呈现、后期加工等方面都呈现出更为便利且精准的优势。在具体的设计实践过程中, 这些优势被直观地展现于软件技术与数控设备结合的工作流中, 使设计师得以凭借先进的结构模型与计算手段来解决复杂的实际问题。例如 RHINO+GRASSHOPPER 的参数化建模系统便是通过简单的数值和电池组来对模型进行调控的, 通过利用计算机高效计算的特点来完成对精确模型的设计生成, 见图 1。而 MAYA 和 ZBRUSH 这类建模系统则是结合数位板与压感笔等外部设备, 在面与面的桥接下以更偏向于手工调控的工作流程来实现视觉化艺术创作的, 见图 2。由此可见, 数字建构已凭借其高效性、准确性、创造性等特征突破了传统的束缚, 在释放设计自由度的同时推动了相关产品的创新。



图 1 RHINO+GH 生成的参数化拓扑模型  
Fig.1 Parametric topology model generated by RHINO+GH

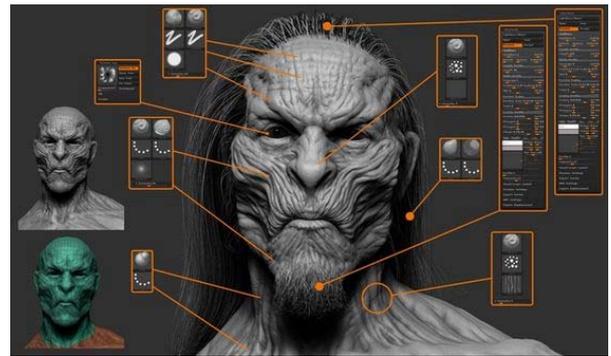


图 2 MAYA+ZBRUSH 生成的精细化模型  
Fig.2 Refined model generated by MAYA+ZBRUSH

### 1.2 增强现实

1965 年, 计算机专家伊凡·苏泽兰首先提出了“终极显示”的概念, 在苏泽兰的设想中, 未来将存在一种显示器能使观众无法分辨其呈现的内容与现实世界的差别。这一创造性的设想也成为了之后增强现实的核心概念: 将多感官构成的沉浸式交互的虚拟世界融合至现实场景中。在增强现实技术的帮助下, 人们可以通过多感官感知的方式, 将现实世界中难以体验到的视觉、听觉、触觉、嗅觉以及味觉等具体信息融入超越现实的感受体验之中<sup>[5]</sup>。增强现实凭借其特有的交互性, 结合了数字建构语境下的物质与非物质数字技术, 在扩展了用户感知范围的同时拓宽了交互设计与数字建构的语义, 为后续理论与实践的创新提供了全新的思路, 见图 3。随着相关技术的逐渐成熟, 增强现实也已广泛应用于军事、教育、娱乐、医疗乃至设计行业。



图 3 AR 技术在移动设备上的应用  
Fig.3 Application of AR technology on mobile devices

## 2 AR 辅助交互系统在听障患者中的应用预想

### 2.1 听障患者对辅助产品的需求分析

鉴于听力感官的功能缺失所导致的种种问题, 面向听障患者的辅助产品更需围绕患者自身的实际需求进行设计。在此基础上, 对于听障患者的普适性需求分析可以基于马斯洛需求层次理论 (见图 4), 结合听障患者与辅助用具的交互特点, 分为安全与生理需求以及社交与心理需求。

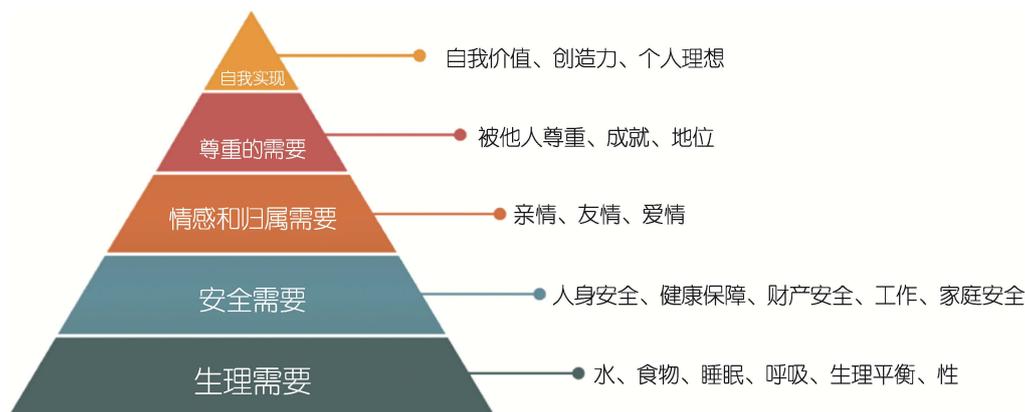


图4 马斯洛需求层次理论  
Fig.4 Maslow's hierarchy of needs

### 2.1.1 安全与生理需求

安全与生理需求指的是人身安全、生活稳定的需要,以及免遭痛苦、威胁或疾病等。对听障患者来说,其个人的安全需求在听觉信息的长时间缺失中很难得到保障。因此,辅助交互产品的设计需要首先考虑到对用户的交互性引导,在以安全性为首的前提下合理规划用户的交互行为,从而保障用户的出行安全。

### 2.1.2 社交与心理需求

社交与心理需求指的是一个人与其他人建立感情的联系或关系的需要,以及对审美、认知等精神层面的需求。基于较差的沟通效率与社交体验,听障患者常会产生孤独感、自卑感以及缺乏安全感等负面情绪,从而导致不同程度上的心理问题。与此同时,由于助听设备的特殊性,长时间的强制佩戴往往会令患者对助听设备产生抵触心理,甚至影响生活,造成不同程度的自我认知能力的不足。而通过设计优良的产品融入弱势群体的生活来提供帮助,能使他们感受到尊重和关怀而不会产生排斥被他人同情的心理障碍<sup>[6]</sup>。由此可见,针对辅助交互产品的设计同样需要以听障患者心理保护与审美情感的提升为前提,在充分满足听障患者对设计个性化的需求的同时满足听障患者的社交与精神需求,为后续设计实践的发展提供可参考的框架。

## 2.2 听障用户对AR辅助交互系统的应用场景构想

“场景”一般指戏剧、电影等艺术作品中的场面,在生活中泛指特定的情景<sup>[7]</sup>。如今这一词汇越来越多地与设计相关联,指的是设计过程中真实的以人为中心的体验细节<sup>[8]</sup>。在不同场景下,用户对于产品的功能以及交互模式的预期也会有所不同<sup>[9]</sup>。特别是对残障人群来说,相关辅助设备的用户场景体验更应该受到重视。因此,针对AR交互辅助系统的应用场景构想应直接把听障患者的行为作为设计对象,在具体的场景中预测用户目标,从而为用户提供更为完善且流

畅的使用体验。具体来说,用户对于产品的应用场景构想可被分为客观场景与目标场景。

### 2.2.1 客观场景

客观场景指的是客观存在于现实生活中的场景。听障患者在出行、交流等过程中所处的真实环境或是其遇到的突发状况都被纳入对客观场景的构想中<sup>[10]</sup>。在听障患者日常出行的客观场景下,患者便往往会由于感官能力缺失而发生各种类似于交通事故、迷路、沟通不畅的状况。因此,只有在事先经过了对此类客观场景的构想,设计师才得以在日常生活中提取听障患者的安全以及社交需求,从而解决患者的实际问题。由此可见,设计师需要在客观场景的构想中找到用户痛点,并在随后的设计实践中提出相应的解决路径。

### 2.2.2 目标场景

目标场景是建立在客观场景之上,设计师所期望达成的能解决用户客观场景中相关问题与需求的用户场景<sup>[11]</sup>。对听障患者来说,其目标场景是相对明确的,即无障碍地进行各类活动。因此,在对听障患者目标场景的构想中,设计师需要考虑到用户的环境体验、行为体验和情绪体验,在感知用户使用产品过程中的行为、模式以及心理活动的同时,对客观场景进行分析研究,借此构建能够满足用户需求的目标场景。

## 3 AR现实交互听障辅助系统的设计策略

### 3.1 AR听障辅助系统的设计原则

基于听障用户对辅助系统的需求分析与应用场景构想,增强现实交互听障辅助系统应在设计中遵循信息无障碍、感官代偿、情感化原则,从而进一步推动助听设备在现有基础上的创新发展。

#### 3.1.1 信息无障碍原则

信息无障碍是指通过信息化手段弥补身体机能、所处环境等存在的差异,使任何人都能平等、方便、安全地获取并使用信息<sup>[12]</sup>。由于残疾人生理方面的缺

陷, 其在生活中遇到障碍的可能性较常人更高。因此, 对于听障辅助系统的设计, 需要以信息无障碍原则为基础, 在数字技术的帮助下从信息可理解性与信息有效性两个角度入手, 确保听障患者能够在无障碍的前提下获取相关信息。在信息可理解性层面, 用户对于信息的无障碍获取可以被理解为相关交互智能产品应符合用户的认知方式与使用习惯。进一步来说, 有关产品需要以完善的信息架构为前提, 在充分考虑到产品容错率的同时提高用户对信息获取的效率。在信息有效性层面, 信息无障碍下的设计实践可利用多通道的交互模式, 为特殊群体难以获取的视觉或听觉等信息寻找等效替代通道, 完善产品交互逻辑, 提升信息反馈实时性, 使特殊群体的无障碍需求得到满足。

信息无障碍的概念自 20 世纪 60 年代开始便已在发达国家受到关注。1961 年, 美国制定了第一个《无障碍标准》。1974 年, 联合国组织正式提出了信息无障碍的设计主张, 进一步完善了无障碍的理念<sup>[13]</sup>。近年来, 在我国经济与文化水平迅速发展的形势下, 对特殊群体权益的保障已成为重要的社会议题。2021 年, 在中国残联等 13 部门印发的《无障碍环境建设“十四五”实施方案》中, “大力发展信息无障碍建设”被着重提出, 借力技术跨越障碍成为研究重点<sup>[14]</sup>。在针对听障患者的设计实践之中, 腾讯天籁实验室推出了一个集测听、辅听、远程看护于一体的应用程序, 用户可以根据自身情况得到不同的辅听增益。微软的 Microsoft Translator、Kinect 则对听障人士在语言翻译、手语沟通方面的需求进行了深入研究, 以软硬件结合的方法体现了产品的信息无障碍化原则。

### 3.1.2 感官代偿原则

感官代偿最早出现在医学领域, 是指人在某个感觉器官遭受损害甚至缺失时, 人就会被动调控其他器官的感觉能力, 以适应生理机制的变化、保障生存<sup>[15]</sup>。对听障人士来说, 听觉功能的缺失会在一定程度上使其他感官能力得到增强, 此时, 感官代偿的原则便可以运用于相关辅助设备中。

研究数据表明, 83% 的外部信息都是由视觉感官接收的。因此, 作为人类获取信息的最主要途径, 视觉代偿可以作为听障患者最主要的代偿方式。例如 Google Glass 与 Microsoft Hololens 等可佩戴设备都在设计中引入了感官代偿的设计原则, 通过传感器、微型摄像头、抬头显示器等数字设备为用户在视觉层面上提供了平常难以感知到的信息, 增强了视觉感官系统的感知能力, 并在增强现实与感官代偿的过程中补偿了听障患者在感官上的缺失, 见图 5。

### 3.1.3 情感化原则

认知心理学家唐纳德·A·诺曼将情感化设计分成



图 5 微软 Hololens 混合现实可佩戴设备  
Fig.5 Microsoft Hololens MR wearable device

三个层次: 本能层次、行为层次和反思层次, 分别对应产品中的造型、效用以及意义<sup>[16]</sup>。其中, 诺曼对于反思层设计的阐述尤为关键, 他强调产品设计要在满足用户使用需求的同时, 还能带来情感上的共鸣和精神上的愉悦。而由于听障患者生理上的局限, 相关辅助设备的设计便更应注重患者的情感需求, 外观呆板、功能单一的辅助设备往往会令患者产生抵触心理, 从而影响到其生理乃至心理状态。因此, 市面上已有产品将情感化原则代入具体设计之中, 例如日本博报堂开发的一种新型听力辅助产品“Orchestra Jacket”便创造性地将助听设备以科技外套的造型进行呈现, 通过将声音转换成振动的方式, 使听障患者在乐观积极的情绪中感受到声音的存在, 见图 6。

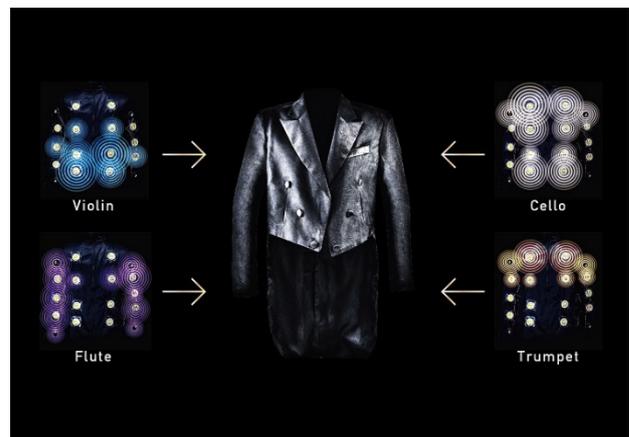


图 6 “Orchestra Jacket” 听力辅助夹克  
Fig.6 "Orchestra Jacket" hearing aid jacket

## 3.2 AR 听障辅助系统的技术实现

当下, 增强现实正以一种全新的姿态进入设计领域, 增强现实开始朝着产品化、系统化的方向发展。在 AR 听障辅助系统的实现过程中, 移动计算、跟踪注册与体感交互技术起到了至关重要的作用。

### 3.2.1 移动计算

从定义上来看, 移动计算的范畴覆盖了可移动设

备各类型数据的产生、分享、显示等全链条过程,其中的数据可能来源于人机交互,也可能来自于设备感知。在应用层面,移动计算凭借其移动性高、续航能力强、高性能的特点主要呈现于智能手机这类数字设备之中。但随着5G、AI技术的普及和人机交互形式的革新,移动计算的形态已从手机、电脑延伸至可穿戴的外界设备之中。对可穿戴增强现实系统来说,通信技术与算法的拓展与迁移催生了更加多元化的移动平台,例如高通发布的骁龙XR2移动数字平台便凭借其强大的移动计算能力,将增强现实交互系统搭载至可穿戴设备中,有助于提升听障患者获取信息的时效性、准确性,为传播信息媒介的升维提供了可能。

### 3.2.2 跟踪注册

增强现实系统的最终目的是实现虚拟物体和显示物体的完美融合,要达到这一目标,除了需要依靠移动计算技术之外,还必须获取虚拟物体在实际环境中的确切位置。而根据用户视场与视点的跟踪,将虚拟物体显示至真实环境中的精确位置的技术就是跟踪注册<sup>[17]</sup>。在AR辅助系统的使用过程中,用户常常通过头部、眼珠的转动来获取外部的信息,因此,对外界物体的精确定位和实时跟踪便显得尤为重要。目前,基于传感器的移动增强现实开发系统已逐渐成熟,主要包括了基于磁场、光学、声学以及惯性的四类主要技术。其中,光学式跟踪设备凭借其信号接收速度快、刷新率高等特点,更多地被应用于听障辅助这类具有较高实时性要求的AR系统中。如今,在移动计算能力的大幅提升下,跟踪注册技术突破了以往实时性不佳的局限,在大范围高精度的增强现实环境下听障患者与外部世界进行良好的交互已成为可能。

### 3.2.3 体感交互

体感交互是基于体感设备来实现信息采集、传递和处理的数字技术,其在机器学习算法的帮助下,对人体动作、眼动、语音、表情等数据进行跟踪与采集,从而预测用户的行为和意图,使用户能够凭借肢体动作来实现与系统的交互。对交互技术在听障辅助系统中的应用来说,体感交互所特有的信息多维性与交互自然性优势无疑更符合听障群体的行为习惯以及交互需求。以体感技术的信息多维性为例,体感交互凭借光学感测、惯性感测、骨骼感测、肌电感测等先进的交互技术,通过人的五感来获取多维信息,在感官代偿的原则下满足了特殊群体进行信息交互的需求<sup>[18]</sup>。然而,由于成本高昂、技术复杂、行为预测难度大等问题,体感交互技术目前还是主要运用于如微软Kinect、Leap motion这类将正常人作为目标群体的体感交互设备中。鉴于当下助听设备市场停滞不前的现状,面向听障患者的产品设计研究更应从技术出发,在数字建构背景下进行设计实践,力求实现AR听障辅助系统的市场化、普及化。

## 3.3 数字建构对AR听障辅助设备的设计帮助

在数字技术的飞速发展下,助听设备的种类已从盒式转向入耳耳机式与眼镜式等,其技术核心也从降噪、语音增强转向增强现实方向。相较于传统的耳机式助听设备,类似于眼镜的辅助产品无疑在外观的普及性以及用户的接受性上都呈现出明显的优势。但与普通眼镜相比,搭载了扬声器、摄像头、光学组件等部件的AR听障辅助眼镜重量较重,体积也更大,考虑到听障患者往往是全天候佩戴并使用助听设备,如何保证设备的精密度以及用户佩戴时的舒适度成为设计的难点。在这一背景下,数字建构的介入为解决该问题提供了可能。

首先,数字建构的非物质数字技术可用于对产品造型及细部尺寸的把控上。设计师利用非物质数字技术,通过犀牛、Alias等3D建模软件在计算机中对产品造型进行呈现,在经过对用户头面尺寸数据的定性与定量分析后,进一步使用有关插件对不同规格的产品尺寸与外观进行优化与迭代,在减少了时间与材料成本的同时便于设计师对方案进行修改。其次,数字建构的物质数字技术可以用于产品的生产制作环节。基于用户对助听产品尺寸、造型的多样性需求,数字建构下的物质数字技术以3D打印的方式针对不同的使用者个性化定制更适合的尺寸与材料,不仅为用户提供更舒适的佩戴体验,而且也为AR交互辅助系统提供了良好的运行环境,在提高产品美观度的同时避免了大规模机械化生产所带来的尺寸误差。

由此可见,针对AR听障辅助系统的设计不仅需要遵循信息无障碍、感官代偿、情感化原则,以满足用户在不同应用场景下的具体需求,也需要使用移动计算、跟踪注册、体感交互技术来实现系统的增强现实功能。而在辅助设备的造型设计以及生产环节中,设计师需要使用建模软件对产品外观进行生成与优化,并采用3D打印这类数字化生产方式对产品进行再加工与批量化生产,从而以数字建构的设计方式提升产品的普适性与精确性。

## 4 数字建构下AR现实交互听障辅助系统的设计实践

### 4.1 设计概况

#### 4.1.1 设计目标

在理论层面,设计以听障群体生理与心理上的特殊性为切入点,引入信息无障碍、感官代偿、情感化原则,试图在数字建构的视域下提高产品对于听障患者的吸引力。在技术层面,设计囊括了增强现实下的移动计算、跟踪注册、体感交互等数字技术,期望通过数字技术的高效计算以及非线性逻辑来实现产品的

外观以及系统的构建,在满足听障患者实际需求的同时,进一步为相关设计产品的精细化和集成化提供思路。

#### 4.1.2 设计定位

根据世界卫生组织 2021 年发布的《世界听力报告》<sup>[9]</sup>,听障患者的听力损失等级大致可以被分为轻度、中度、中重度、重度、极重度六类,其中,中度以上听力损失患者在安静环境下的听力体验会出现偏差,而极重度听力损失患者则基本听不到外界的声音。由此可见,患者由于听力损失程度的不同,其对产品的主要需求也会产生差异。因此,基于上述分类标准,以听力阈值大于 35 的中度到极重度听力损失患者为目标人群,并凭借可选择的功能以及交互模式来满足不同听力损失等级患者的差异化需求。

#### 4.2 设计方案

设计方案名为“GLASS”,见图 7。该设计使用数字建构的设计方法,首先通过数字建模、3D 打印等方式对眼镜的外观造型进行构想,其次引入助听系统与 AR 交互听障辅助系统,在遵循了信息无障碍、感官代偿、情感化设计原则的同时满足了听障用户的特殊需求。



图 7 “GLASS”设计展示  
Fig.7 Design of “GLASS”

在外观层面上,“GLASS”以护目镜为灵感来源,整体由镜片、镜框与一侧投影 AR 内容的延伸臂构成。相较于传统的眼镜造型设计,“GLASS”自身具有多边形的标志性特征,以便与其他产品进行区分,同时,产品加入了小面积亮色作为点缀,打破了消费者对辅助设备单一、呆板的刻板印象,体现了设计所遵循的

情感化原则。

在技术层面上,“GLASS”是一款在数字建构下结合了 AR 辅助系统,旨在为听障患者提供更好体验的助听器。设备引入了以光波导为主的光学跟踪注册技术,在保证助听功能的同时有助于增强现实系统的载入。具体来说,光波导装置使用三种不同的透明材质,分别作为基片、介质膜和覆盖层来组成一个透明的实体,通过射入光线在其中折射最终在人眼前呈现的方式来实现 AR 增强的功能,使用户能在直观的体感交互中获取所需的信息。在声音的传输方面,设计采用了骨传导技术来实现助听功能。由于声音在骨头内传导的损失率远低于空气传导,因此,该技术将声波转化为不同频率的机械振动,使内耳外淋巴发生相应波动,从而产生听觉。总的来说,设计结合了增强现实与听觉辅助等相关技术,在感官的转换中提高了用户获取外部信息的效率,以感官代偿的方式弥补了听障患者在生理上的缺失。

在交互层面上,“GLASS”根据用户的听力损失等级及其所处的客观场景制定了不同的交互模式。首先,产品的多感官交互机制为听障用户提供了多种交互方式,实现了产品操作的更多可能性,更加方便用户的独立使用。其中,视觉代偿作为交互模式的核心,将用户所需的信息投射至眼前的透明材质之上,为用户提供了简单易懂的交互方式。其次,根据用户不同的听力损失等级,产品设定了个性化的交互流程。在轻度、中度、中重度的听障患者选择了其听力损失等级后,系统会选择以去噪、声音增强的助听功能为主,增强现实、视觉代偿功能为辅,而重度与极重度的患者则反之。最后,用户在不同场景下对产品的使用方式也会随之产生变化,在较为嘈杂的环境下,用户可以自主地调整并切换系统功能,从而实现设备在差异化应用场景下的高扩展性与可用性,体现了设计所遵循的无障碍原则。

## 5 结语

增强现实是集信息集成、实时交互、跟踪定位等多功能于一体的关键技术,其与助听产品的结合具有极大的应用价值。但是,由于制作成本较高、经济效益较低等多种原因,有关研究相对缺失。本文基于听障用户对助听设备的具体需求与场景体验,将信息无障碍、感官代偿、情感化原则作为设计指导,在探究了增强现实听障辅助系统深度开发可能性的基础上,进行了增强显示交互听障辅助产品的设计实践,为助听设备的创新设计提供了新思路。如今,数字建构语境下的增强现实技术与残疾人辅助设备已呈现出不断融合的趋势,而随着相关算法以及硬件设施的发展,未来针对残疾人辅助设备的相关研究更应结合增强现实技术,对相应产品进行创新,从而提高残疾人的生活质量。

## 参考文献:

- [1] 纪钢. 第二次全国残疾人抽样调查主要数据公报(第二号)[J]. 中国残疾人, 2007(6): 12-13.  
JI Gang. Bulletin of Main Data of the Second National Sample Survey of Disabled Persons (No.2)[J]. Disability in China, 2007(6): 12-13.
- [2] 尼尔·林奇, 徐卫国. 数字建构: 青年建筑师作品[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.  
XU Wei-guo. (Im) material processes[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.
- [3] 徐卫国. 数字新锐 正在涌现的中国新一代建筑师[J]. 时代建筑, 2011(2): 40-45.  
XU Wei-guo. Digital Avant-Garde Emerging Architects in China[J]. Time Architecture, 2011(2): 40-45.
- [4] 方立新, 周琦, 孙逊. 数字建构的反思[J]. 建筑学报, 2011(10): 90-94.  
FANG Li-xin, ZHOU Qi, SUN Xun. Reflecting on Digital Tectonics[J]. Architectural Journal, 2011(10): 90-94.
- [5] 刘子建, 李欣. 基于增强现实技术的儿童数字化阅读产品设计[J]. 包装工程, 2019, 40(8): 197-203.  
LIU Zi-jian, LI Xin. Design of Children's Digital Reading Products Based on Augmented Reality Technology[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(8): 197-203.
- [6] 黄凌玉, 刘天理. 视障者无障碍产品的交互创新设计研究[J]. 包装工程, 2017, 38(24): 108-113.  
HUANG Ling-yu, LIU Tian-li. Interactive Innovative Design of Barrier-Free Products for the Blind[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(24): 108-113.
- [7] 陈义冰. 浅谈影视动画中的场景设计[J]. 新闻界, 2008(5): 177-180.  
CHEN Yi-bing. On the Layout Design in Animated Film and Video[J]. Press Circles, 2008(5): 177-180.
- [8] 王丹力, 华庆一, 戴国忠. 以用户为中心的场景设计方法研究[J]. 计算机学报, 2005, 28(6): 1043-1047.  
WANG Dan-li, HUA Qing-yi, DAI Guo-zhong. Research on User-Centered Scenario-Based Design[J]. Chinese Journal of Computers, 2005, 28(6): 1043-1047.
- [9] 贾乐宾, 薛孝媛. 场景体验下骑行用户便携式无人机交互设计[J]. 包装工程, 2020, 41(8): 186-192.  
JIA Le-bin, XUE Xiao-yuan. Interaction Design of Riding User Portable UAV under Scene Experience[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(8): 186-192.
- [10] 王玉梅, 胡伟峰, 汤进, 等. 产品交互设计中场景理论研究[J]. 包装工程, 2017, 38(6): 76-80.  
WANG Yu-mei, HU Wei-feng, TANG Jin, et al. Scene Theory in Product Interaction Design[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(6): 76-80.
- [11] 梁恺文, 李焱林. 基于用户场景的交互设计流程研究[J]. 包装工程, 2018, 39(16): 197-201.  
LIANG Kai-wen, LI Yan-lin. Interaction Design Flow Based on User Scenario[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(16): 197-201.
- [12] 杨飞. 论残疾人的信息无障碍权[J]. 河南财经政法大学学报, 2013, 28(2): 118-124, 164.  
YANG Fei. On the Barrier-Free Right of Information of the Disabled[J]. Journal of Henan University of Economics and Law, 2013, 28(2): 118-124, 164.
- [13] 何川. 国内信息无障碍的现状 & 展望[J]. 现代电信科技, 2007, 37(3): 4-8.  
HE Chuan. Status and Prospects of Information Accessibility in China[J]. Modern Science & Technology of Telecommunications, 2007, 37(3): 4-8.
- [14] 钟欣. 十三部门联合印发《无障碍环境建设“十四五”实施方案》将无障碍环境建设情况纳入城市体检指标体系[J]. 建筑设计管理, 2021, 38(11): 95.  
Zhong Xin. Thirteen Departments Jointly Issued the "14th Five-Year Plan for the Implementation of Barrier-Free Environment" to Include the Construction of Barrier-free Environment into the Index System of City Physical Examination[J]. Architectural Design Management, 2021, 38(11): 95.
- [15] 王琦, 郭艳, 张红涛, 等. 感官代偿下的盲人产品设计研究[J]. 包装工程, 2022, 43(S1): 96-103.  
WANG Qi, GUO Yan, ZHANG Hong-tao, et al. Research on Product Design of Blind People under Sensory Compensation[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(S1): 96-103.
- [16] 孙雪阳. 面向视障人群的公共艺术设计研究[D]. 无锡: 江南大学, 2022.  
SUN Xue-yang. Research on Public Art Design for Visually Impaired People[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2022.
- [17] 高净业. 增强现实人机交互系统的研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2011.  
GAO Jing-ye. Research of Augmented Reality Man-machine Interaction System[D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2011.
- [18] 王真. 面向视障人士的体感交互式智能产品设计研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2020.  
WANG Zhen. Intelligent Product Design Research for the Visually Impaired Based on Embodied and Tangible Interaction[D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2020.
- [19] 谢静, 贺璐, 龚树生. WHO 世界听力报告的解读与思考[J]. 中华耳鼻咽喉头颈外科杂志, 2021, 56(10): 1131-1135.  
XIE Jing, HE Lu, GONG Shu-sheng. Interpretation and Thought on the WHO World Report on Hearing[J]. Chinese Journal of Otorhinolaryngology Head and Neck Surgery, 2021, 56(10): 1131-1135.

责任编辑: 马梦瑶