

虚拟现实技术发展综述

*

江南大学 信计 1901 班 学号

【摘 要】 在人工智能和 5G 技术的背景下, 笔者首先分析了 VR 相关文献的发布数量和主题分布, 研究了 VR 技术的发展趋势。VR 技术的发展主要经历了五个阶段: 概念萌芽、技术探索、陷入停滞、突破发展、产业应用, 笔者对五个阶段进行了简要介绍。笔者对 VR 技术原理进行了介绍, 并分析了现有的 VR 软件和硬件。VR 技术应用于国防军事、教育培训、医疗保健、工业制造、娱乐文化等领域。尽管虚拟现实发展可能会面临安全及技术等问题, 但它竞争潜力大, 未来应用领域会不断拓展。

【关键词】 沉浸式, VR, 虚拟现实, 交互模式

1 引言

虚拟现实 (Virtual Reality, 简称 VR), 简称为虚拟技术, 也称虚拟环境, 是利用电脑模拟产生一个三维空间的虚拟世界, 提供用户关于视觉等感官的模拟, 让用户感觉仿佛身历其境, 可以即时、没有限制地观察三维空间内的事物。用户进行位置移动时, 电脑可以立即进行复杂的运算, 将精确的三维世界影像传回产生临场感。该技术集成了电脑图形、电脑仿真、人工智能、感应、显示及网络并行处理等技术的最新发展成果, 是一种由电脑技术辅助生成的高技术模拟系统。

国外学者虚拟现实技术研究起步较早, 他们对虚拟现实技术的认识涉及技术、系统及应用开发等各方面。虚拟现实技术研究起源于计算机图形学, 现已扩展到仿真、传感等多个学科领域。虚拟现实依赖于三维 (Three Dimensional, 简称 3D) 立体头部跟踪显示及身体跟踪感应技术, 这构成一种身临其境的多感官体验。Weiss 和 Jessel 认为 VR 包括计算机和各种多媒体外围设备, 以产生一个模拟的 (即虚拟的) 环境, 使用户认为与现实世界的物体和事件相媲美^[1]。Mel Salter 认为虚拟现实的理想定义不仅应包括计算机生成世界, 还应包括感知环境的虚拟现实系统^[2]。

2 文献调研

2.1 文献数量

以“VR”为关键词在知网数据库中进行检索 (时间为 2022 年 5 月 29 日, 检索范围为 1993 年以后的所有文献), 共查得文献 53858 篇。通过对检索结果进行分析, 如图 1 所示。可以发现, 自 1993 年开始, VR 技术相关研究以较快的速度发展, 论文数量稳步增加。在进入 21 世纪之后, VR 技术停滞, 论文发表数量趋于稳定, 有小幅度的下降。到达 2016 年, VR 技术迎来了大爆发, 文章发表数量出现了一次大的增长。但是在快速增长了若干年之后, 从 2020 年开始 VR 技术呈现了相当大的下降趋势, 这可能与疫情有关。

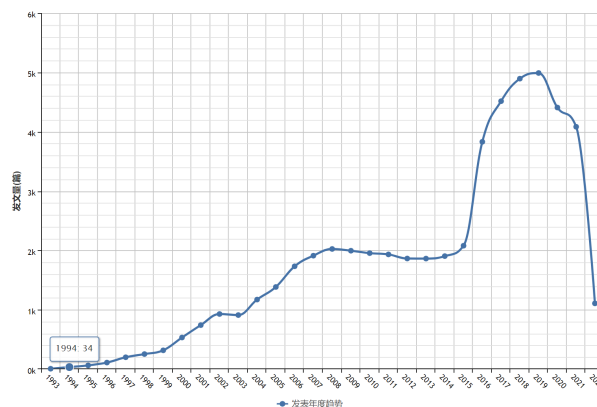


图 1 文献数量

2.2 文献主题

仍然以“VR”为关键词在知网数据库中进行检索从文献, 获得的文献主题如图2所示。主题上来看, 去除了如“虚拟现实”、“虚拟现实技术”、“现实技术”等较为笼统的主题, 从剩余的主题中选取出排名前五的主题: “教学中的应用”、“漫游系统”、“Unity 3D”、“GIS”、“实验教学”。可见, VR 技术在工业教育等应用领域、媒体展示领域以及与增强现实混合现实融合领域受到了较多的关注。

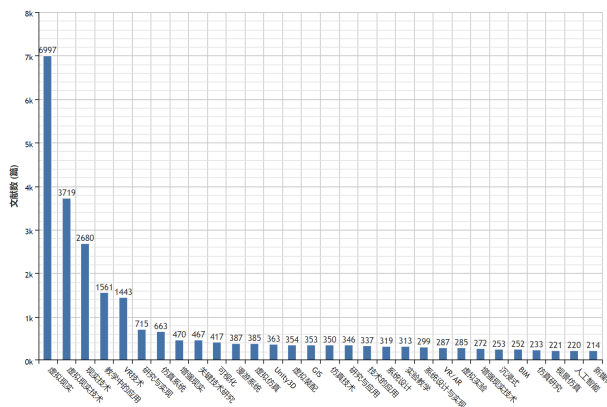


图2 文献主题

与以上采取的方法相同, 仍然以“VR”为关键字进行检索, 得到的学科图如图3所示。可以看到计算机科学占据了文献学科的半壁江山, 大约为44.2%, 这是因为虚拟现实技术研究起源于计算机图形学, 但是随着技术的不断成熟, 现已扩展到仿真、传感等多个学科领域。可以从学科图中看到, VR 技术应用的领域非常众多, 已经渗透到了各个行业的方方面面。

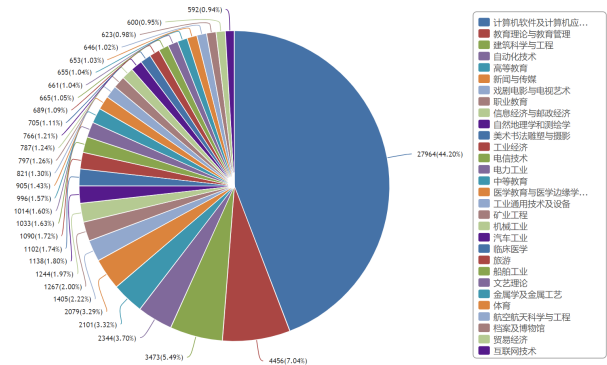


图3 文献学科

3 发展历程

虚拟现实概念由来已久, 其他技术诸如计算机科学的成熟促进着虚拟现实技术研发和产业发展。VR 技术的发展历程如图4所示, 回溯虚拟现实技术的发展历程, 总结发现其大致可划分为5个阶段: 概念萌芽、技术探索、陷入停滞、突破发展和产业应用。

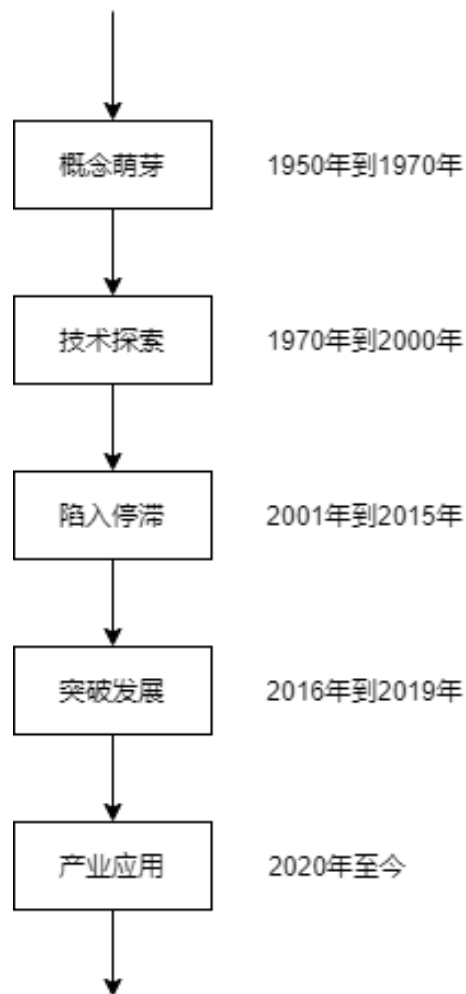


图4 发展历程

3.1 概念萌芽

虚拟现实的确切起源存在争议, 部分原因是为另类存在的概念制定定义非常困难。^[3]早在文艺复习时期欧洲透视法的发展创造了惟妙惟肖的空间, 即所谓的“multiplying of artificial worlds”。^[4]虚拟现实的其他元素早在1860年代就出现了。安东宁·阿尔托认为幻觉与现实并无二致, 主张观剧者应暂停怀疑, 将舞台上的戏剧视为现实。而虚拟现实技术第一次提及来自Antonin的科幻小说^[5]。

现今大家所熟知的头戴式显示器的前身则出现在 1961 年, Philco 公司工程师 Comeau 及布 Brian 将他们开发出名为“ Headsight” 简易运动跟踪头戴式显示器^[5]。1962 年, Morton Heilig 制作了一个名为 Sensorama 的视觉原型^[6], 并在其中展示了五部短片, 同时涉及多种感官(视觉、听觉、嗅觉和触觉)。在数字计算之前, Sensorama 是一种机械设备。Heilig 还开发了他所谓的“ Telesphere Mask”。该专利申请将该设备描述为“一种供个人使用的伸缩式电视设备……观众可以完全感受到现实, 即移动可能是彩色的三维图像, 具有 100% 的周边视觉、双耳声音、气味和微风。” 1968 年, Ivan Sutherland 在包括 Bob Sproull 在内的学生的帮助下, 创建了被广泛认为是第一个用于沉浸式模拟应用的头戴式显示系统。它在用户界面和视觉逼真度方面都很原始, 而且用户佩戴的 HMD 很重, 不得不悬挂在天花板上, 如 5 图所示。

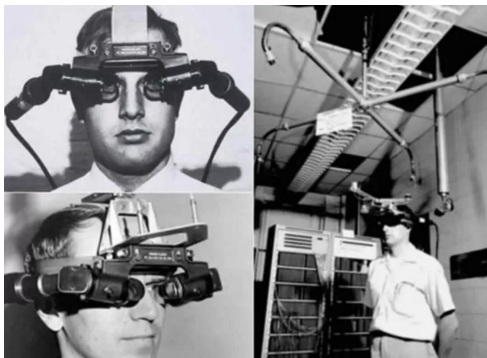


图 5 最早的 VR 设备

3.2 技术探索

20 世纪 70 到 80 年代虚拟现实技术发展速度加快^[7], 光学技术和其他触觉设备同步发展, 这让用户在虚拟空间中移动和交互成为现实。1977 年到 1984 年间, David Em 成为第一位在美国宇航局喷气推进实验室(JPL)制作可导航虚拟世界的艺术家^[8]。他制作了阿斯彭电影地图, 一个粗略的虚拟之旅, 如图 6 所示, 用户可以在其中一个在阿斯彭的街道上漫步三种模式(夏季、冬季和多边形)。

到 1980 年代后期, “虚拟现实”一词由该领域的现代先驱之一 Jaron Lanier 推广。Lanier 于 1985 年创立了 VPL Research 公司。VPL Research 开发了多种 VR 设备, 例如 DataGlove、EyePhone 和 AudioSphere。VPL 将 DataGlove 技术授权给美泰,

美泰用它来制造 Power Glove, 这是一款早期价格实惠的 VR 设备。

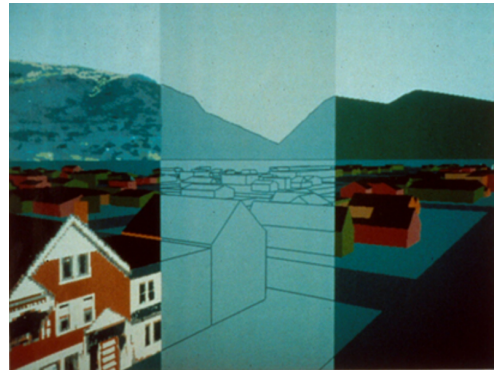


图 6 阿斯彭

1988 年, Autodesk 的 Cyberspace Project 率先在低成本个人计算机上实现 VR^[9]。项目负责人 Eric Gulichsen 于 1990 年离职, 创立了 Sense8 Corporation 并开发 WorldToolKit 虚拟现实 SDK, 该 SDK 在 PC 上提供了第一个带有纹理映射的实时图形, 并在整个行业和学术界广泛使用^[10]。

任天堂的 Virtual Boy 控制台于 1995 年发布, 如图 7 所示。西雅图的一个小组公开演示了一个名为“虚拟环境剧院”的“洞穴式”270 度沉浸式投影室, 由企业家 Chet Dagit 和 Bob Jacobson 制作。Forte 于同年发布了 VFX1, 这是一款基于 PC 的虚拟现实耳机。



图 7 任天堂的 Virtual Boy

3.3 陷入停滞

2000 年代是公众和投资对商用 VR 技术相对冷漠的时期。2001 年, SAS Cube (SAS3) 成为第一个基于 PC 的立方体房间, 由 ZA Production (Maurice Benayoun、David Nahon)、Barco 和 Clarté 开发。它安装在法国拉瓦尔。SAS 库催生了 Virtools VRPack。2007 年, 谷歌推出了街景服务, 其界面如图8所示, 该服务可显示全球范围内越来越多的位置 (如道路、室内建筑和农村地区) 的全景。它还具有立体 3D 模式, 于 2010 年推出。



图 8 谷歌街景

3.4 突破发展

2016 年是 VR 设备及内容生态极具里程碑意义的一年。到 2016 年, 至少有 230 家公司在开发 VR 相关产品。亚马逊、苹果、Facebook、谷歌、微软、索尼和三星都有专门的 AR 和 VR 小组。动态双耳音频在当年发布的大多数耳机中都很常见。然而, 触觉界面并没有得到很好的开发, 大多数硬件包都包含按钮操作的手机, 以实现基于触摸的交互。Unity、Blender、CryEngine、Source 等游戏引擎也宣布全面支持 VR。在游戏娱乐领域, EA、UBISOFT、网易、腾讯、网龙等大型游戏公司均发布了各自的代表作品。从这一年开始, 越来越多资本看好 VR 内容 (影视、游戏等) 市场, 大量投资蜂拥而至。国内新兴游戏公司、VR 工作室也陆续推出了一些高质量的 VR 作品, 如《永恒战士 VR》《Aeon》等^[11-12]。2018 年, 沃尔玛公司开始尝试使用虚拟现实技术进行员工培训, 选择 10 家试点商店, 未来将投资 17,000 个 Oculus 耳机, 使虚拟现实培训成为所有单位的标准。2019 年, Oculus 发布了 Oculus Rift S 和独立耳机 Oculus Quest, 如图9所示。与前几代头显中的外部外向内跟踪相比, 这些头显使用了内向跟踪。



图 9 Oculus Rift S

3.5 产业应用

目前, 虚拟现实技术产业化走向新阶段。消费级虚拟现实产品在这一阶段市场反响较大, 虚拟现实技术的日渐成熟使产业化应用成为可能。自 2017 年以来, 虚拟现实与认知行为疗法的整合取得了重大进展, 重点关注如何定制体验以适合每位患者^[13]。随着 2020 年新冠肺炎大流行, VR 正在经历巨大的增长。根据 Grand View Research 的数据, 到 2027 年, 全球 VR 市场将增长到 621 亿美元。

4 原理及实现过程

VR 技术主要有 3 个模块组成, 如图10所示, 光源首先经过显示层然后最终投影给用户。



图 10 VR 技术原理

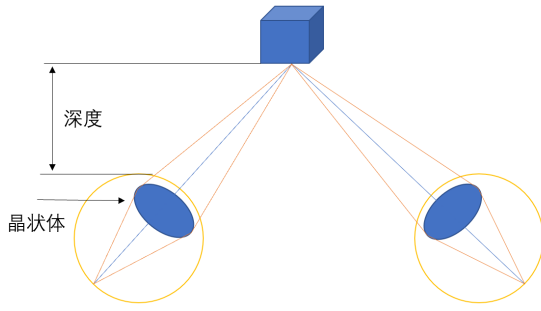


图 11 人眼观察物体

当人眼打算看一个物体时,如图11所示,双眼的运动实际是由立体视差触发的,眼睛向物体旋转。随后,两只眼睛的晶状体开始改变他们的曲率,这导致了焦距的变化,直到眼睛能清楚的看到所要观察的物体为止。在 VR 光学系统中,为双目视图生成 2D 图像以实现 3D 体验,其原理如图12所示。

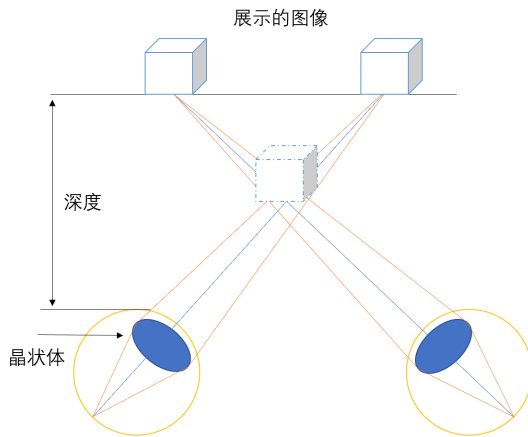


图 12 VR 技术

VR 光学系统可以用如公式1描述,示意图如图13。

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f} \quad (1)$$

其中 p 为物体距离 (物体与投影镜头的距离), f 是投影镜头的焦距, q 是像距 (投影镜头与图像之间的距离)。等式与薄膜透镜相似,当 $p < f$ 时,投影图像为负像距的虚正像。虚拟图像位于物体的同一侧,通常虚拟图像被设计为投射距离 VR 系统 $3m$ 的距离,也就是说,对于 20/20 的人类视觉,

$q = -3m$ (或 $|q| = 3m$), 其中 20/20 的视觉意味着眼睛可以从 20 英尺 (或 6 米) 观察。

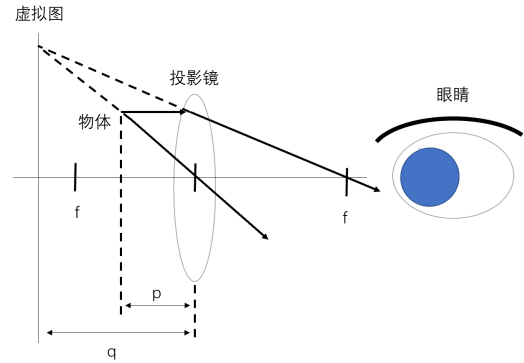


图 13 VR

对于 VR 系统,还需要考虑显示器与镜头之间的光学介质。此外还需要考虑光在引导光学器件和光学组合器中传播时的有效光路,即使它们不会在图像生成中增加额外的透镜功能,因此,公式1应该改写为公式2。

$$\frac{1}{p + \sum_i t_i \cdot \left(\frac{n_i-1}{n_i}\right)} + \frac{1}{q + \sum_j t_j \cdot \left(\frac{n_j-1}{n_j}\right)} = \frac{1}{f} \quad (2)$$

t 和 n 分别是光通过非空气光路传播介质的厚度和折射率, p 是显示器到投影透镜之间的物理距离。 i 是显示器和投影镜头之间的光学介质的编号, j 是投影镜头和虚像之间的光学介质的编号。其中 p 和 f 都大约为几厘米 ($10^{-2}m$), 而 q 大约为几米 (10^1m), 所以公式2可以简化为:

$$\frac{1}{p + \sum_i t_i \cdot \left(\frac{n_i-1}{n_i}\right)} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f} \quad (3)$$

根据公式2,如果 q 不够大,引导光学器件和光学组合器也会影响投影虚像的位置。当光路中的光学元件 (即从显示器到镜头和从镜头到眼睛) 出现透镜效应 (提供透镜屈光度) 或像差时,应根据基本情况进一步修改焦距 f 几何光学。从上面的等式可以清楚地看出,在没有可调光学器件的情况下,像距处于固定位置。

在变焦和多焦光学架构中,通过调整投影光学器件的焦距 (称为基于功率) 在适当的深度投影 2D 虚拟图像,物距 (称为基于距离),或投影光学器件的物距和焦距 (即混合型),如图14所示。

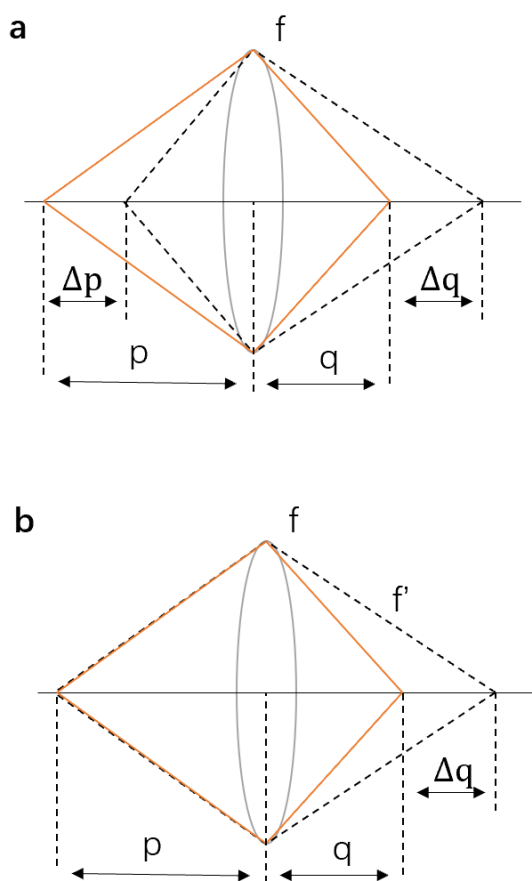


图 14 变焦和多焦点原理

“变焦”、“多焦点”在文献中的定义很宽泛。将 3D 图像分割成多个 2D 图像，这是普遍认可的定义。因此，在这里定义为涉及生成不同二维虚拟图像切片的光学架构。在变焦方法中，单个 2D 图像平面在扫描时间内被时间投影在不同的位置，这接近人眼的响应时间（500ms），如图15所示。变焦方法是一种用于欺骗人眼的时间复用方法。对于多焦光学系统，同时生成多个像平面，如图15所示。这种方法需要足够数量的图像平面，其中相邻图像平面之间的等效光功率应小于 $0.6D$ （例如，在图15中， $1/d_1 - 1/d_2 < 0.6D$ ）。由于这种时间复用技术（变焦方法），投影虚拟图像的亮度会降低。在多焦点方法中，需要空间来放置提供不同光路或焦距的光学元件。一般来说，可调谐光学元件是用于具有不同位置的像平面的基本光学元件。

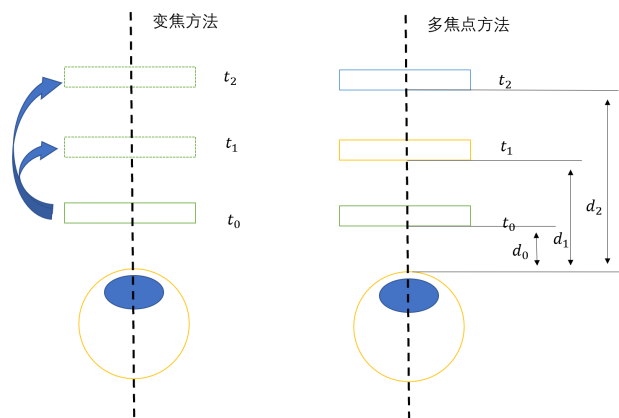


图 15 变焦和多焦点方法

5 技术支持

虚拟现实系统包含软件和硬件 2 个重要组成部分。软件主要有二维图形软件、三维建模软件、虚拟现实开放平台、虚拟现实引擎等；硬件可分为输入和输出设备。综合使用软件与硬件，构建三维虚拟环境，提升用户沉浸感与交互感。

5.1 软件

虚拟现实系统软件种类多样，最重要的有 3 种：三维建模软件、虚拟现实开放平台和引擎。在二维绘图软件基础上进行虚拟现实建模，3DS Max、AutoCAD、Softimage 3D 和 Maya 等是常用三维建模软件。以汉堡博物馆所罗门神庙木制模型为例，Kersten 等学者在 2018 年详细介绍了三维建模方法，精致还原其所有细节^[14]。虚拟现实开放平台 (VR Open Platform) 中有可获取的虚拟现实软件开发工具包 (Virtual Reality Software Development Kit, 简称 VR SDK)。Oculus 提供了一个不断更新的 SDK，用于创建原型并让大众参与应用程序开发过程。虚拟现实引擎是一种软件框架，核心功能包括 2D 或 3D 模型渲染引擎，交互行为或碰撞检测物理引擎，并可能包括音频或视频支持。本质上，虚拟现实引擎就是一种通用开发平台，提供预定义交互及导航功能，设计人员可在源代码基础上进行二次开发。WebVR 提供了一个框架，在火狐网页浏览器中使用 WebGL 来提供虚拟现实体验。虚拟现实系统还包括虚拟声音编辑器、虚拟现实培训模拟器和虚拟现实内容管理等软件，为用户提供更完整的虚拟现实体验。

5.2 硬件

虚拟现实系统输入设备主要分为三大类，三维跟踪定位装置、运动捕捉系统和交互式设备^[15]。

第一，三维跟踪定位装置。用于测量三维对象位置和方向实时变化的专门硬件设备称为三维跟踪定位器^[16]。其在虚拟现实领域一般与其他 VR 设备结合使用，如数据头盔、数据手套等，使参与者能够在空间上自由移动、旋转，操作更加灵活、自如、随意。

第二，运动捕捉系统。运动捕捉是实时测量、记录人体或物体的运动轨迹和姿态，并在三维空间中重建运动体每一时刻运动状态的高新技术，代表性产品有 Kinect（捕捉身体动作）、Leap Motion（捕捉手势）、RealSense（识别表情及手势）、美国魔神公司的 Motion Analysis 系统和诺亦腾开发的 Perception Neuron，如图16所示。

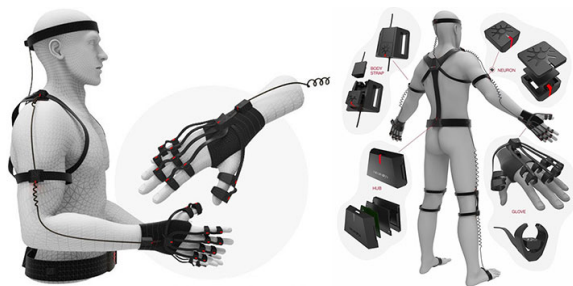


图 16 Perception Neuron

第三，交互式设备。作为虚拟现实系统的重要输入设备之一，交互式设备种类繁多。数据手套是用户使用虚拟系统时非常重要的交互传感设备。用户通过穿戴数据手套，在虚拟环境中抓取、移动、控制物体完成交互。数据衣是人体进行运动捕捉，让虚拟现实系统识别全身运动。VR 手柄一般作为头显设备配套的动作捕捉套件和专属控制器。除了传统手柄外，目前比较契合 VR 操控的主流控制器大致包括 Oculus Touch、Vive 手柄、PS Move、Valve 和谷歌的 Daydream，如图所示。触觉反馈装置的目的是为了模拟人类触觉，提供材质、纹理、温度等多种感觉，可以基于视觉、充气式、振动式等方法实现^[17]。



图 17 Daydream

6 应用场景

虚拟现实技术在很多方面都有着广泛的应用，涉及到航天、军事、通信、医疗、教育、艺术、娱乐、建筑和商业等各个领域。

6.1 国防军事

虚拟现实技术在军事领域的应用可以追溯到 1962 年，当时由 Morton Heilig 研制的虚拟现实原型机“Sensorama”就被美空军引入到模拟飞行训练中^[18]。美军研制的指控训练模拟系统如图18所示。从那时起，美军一直跟踪虚拟技术的发展，并广泛应用于军事训练，从单兵到指挥机构、从单装运用到战场环境，目前已经具备运用虚拟现实技术直接为实战和战争服务的能力^[19]。



图 18 美军指控训练模拟系统

我国于 90 年代初期开始投入与虚拟现实相关的研发工作，通过研究分布式虚拟现实，开发行为建模与基于图像的建模与渲染工具，实现了动态海浪仿真碰撞检测。对于海上作战模拟器来说，重要的并不是环境与地形，而是仪表读数、下潜与上浮的沉浸感。不仅仅在海上领域，弹道导弹，巡航导弹，战斗机，坦克与肩扛式地空导弹的发射以及

单兵/小组作战的决策训练也都应用了虚拟现实技术。

6.2 教育培训

虚拟现实技术提供了一种存在感和沉浸感, 引发情绪化学习, 有助于提高学习者认知水平。众多研究^[20-22]表明, 虚拟现实技术能提升学生学习效果。笔者认为, 这与虚拟现实技术的属性相关。首先, 虚拟现实技术在某些危险学习体验或者昂贵体验上的优势十分明显, 支持学生能学习原本无法掌握的技能; 其次, 虚拟现实技术对真实情景的高度仿真性有助于激发学习者学习动机、提高学习者参与度; 虚拟现实的可视化技术允许学习者直接操作, 实现复杂结构交互, 有效降低认知负荷, 使学习者能够在较短时间内吸收关键信息; 最后, 随着虚拟现实技术向着低成本和大众化方向发展, 虚拟现实技术与在线教育相结合, 丰富和拓展了学习者的学习资源^[23]。



图 19 教学系统

6.3 医疗保健

医疗 VR 是一个给人无限遐想的领域, 它不再只存在于科幻小说爱好者的想象中, 如今已经走进了临床研究者和医疗工作者的视野。虽然这是一个新领域, 但是医疗 VR 技术对患者的生活和医生的工作都可以产生积极的影响^[24]。

卡耐基梅隆大学计算机学院的 Eric Xing 教授和他的团队正在开发一款 APP, 帮助患有帕金森综合症的病人来管理疾病。他表示: “移动健康领域将会在日常生活中发挥重要的作用。我们的 APP 会被动地提醒消费者何时吃药, 还会主动地检测消费者的过去、现在以及未来的活动。它会记录消费者所处的环境与风险等级, 然后对用药剂量、时间、频率等提出相应建议, 并且还能给出预防措施以降低消费者的患病风险。” VR 技术在患者教育中发挥了重要作用。Bio Lucid 公司从高血压预防管理入手, 通过 VR 程序, 消费者可以进入

一个虚拟厨房, 查看每种食物的钠含量, 并通过“吃”下该食物, 跟随食物进入人体内部, 了解高血压对自己的心脏产生了哪些影响。Aicure 公司利用 VR 设备来判断消费者是否按时服药, 其示意图如图 20, 再通过 APP 来获取消费者数据, 用自动算法来识别药物和药物摄取。患者数据会通过 HIPAA (健康保险流通与责任法案) 的兼容网络实时地反馈给临床医生, 这样医生就可以确认消费者是否在按照医嘱嘱咐服药。当然, 这项技术也可以被用来标识不良事件。

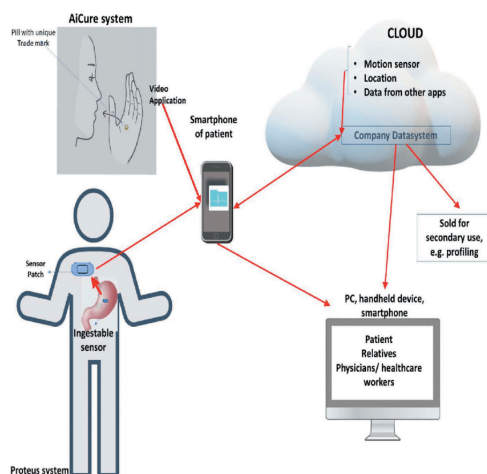


图 20 Aicure

6.4 工业制造

VR 是现实的虚拟, 与多个领域结合产生新技术, 在工业方面, 如坤天自动化, 将此技术运用至零件生产与拆装部位, 在某运行系统基础上, 增加 VR 外设, 使参加培训人员身临其境。VR 不仅仅只应用于游戏娱乐行业, 作为现实虚拟技术, 其与先进高端行业的融合还有待发展, 将现实交互与工业仿真图像结合, 形成展示系统, 属于工业仿真系统的进步^[25]。

VR 在汽车行业领域渗透较深, 如汽车图纸设计、制造、零件组装、销售等。在汽车售卖过程中, 可利用此技术使顾客身临其境体验汽车发动后驾驶体验感, 直观了解汽车。杨亚联等人^[26]通过 Labview RT 和 Carsim 搭建了汽车动力学仿真平台, 完成了基于 VR 的驾驶模拟系统构建。徐劲力等人^[27]以 Microsoft Visual Studio 和 Unity3D 为开发平台, 结合 HoloLens 的人机交互和空间映射技术, 建立了增强现实环境下的汽车后桥虚拟拆卸系统。

6.5 娱乐文化

纵观游戏的发展史,从最早的文字 MUD 游戏到 2D 游戏、3D 游戏,再到沉浸式 VR 游戏,随着游戏画面和技术的进步,游戏的逼真度和沉浸感越来越强^[28]。

就目前发布的 VR 游戏来看,其中不乏恐怖、射击、模拟生存等类游戏。2010 年 Avatar Reality 公司发布了一款名为《多人高尔夫》的 VR 游,如图 21,该游戏需要跟踪用户的头部和手,以提供更好的控制体验。



图 21 多人高尔夫

2016 年 Nvidia 公司推出其第一部原创 VR 游戏《VR Funhouse》,玩家以第一人称视角来进行一些活动,如发射粘液枪击中物体、投掷小球等。该游戏就像是一个专门为 VR 物理运算引擎所做的大型实验。同年发布的还有体验类探险游戏《珠峰 VR》、多人在线射击游戏《勇往直前》等。2016 年 E3 展会上更是展出了多款 VR 游戏。《毁灭战士》、《辐射 4》也将于 2017 年推出 VR 版。另外,《最终幻想》、《生化危机》、《蝙蝠侠:阿甘骑士》等游戏大作将登陆 Playstation VR (PSVR) 平台。



图 22 毁灭战士

7 结语

虚拟现实已经被公认为 21 世纪影响人们生活的重要技术之一,它能给人带来更为逼真、更为自然的人机交互体验。VR 技术与众多新兴技术类似,在经历了最初诞生期的不为人知,到萌芽的举步维艰,以及初期产业化屡遭失败后,终于迎来了春天。目前,随着人工智能技术、5G 通讯技术以及物联网技术的蓬勃发展,未来 VR 的发展前景广阔。未来,随着 VR 技术的不断进步,在电子商务、电视直播、社交等领域,有望突破时空约束,用户可通过虚拟形象的表现来改善性格,甚至进行全球购物,给用户带来更充沛的临场感。为实现上述目标期许,在一些关键技术与理论支撑上,后续研究仍然面临着巨大的挑战。

参考文献

- [1] WEISS P L, JESSEL A S. Virtual reality applications to work[J]. Work, 1998, 11(3): 277-293.
- [2] SLATER M. Immersion and the illusion of presence in virtual reality[J]. British Journal of Psychology, 2018, 109(3): 431-433.
- [3] SCHNIPPER M. Seeing is believing: the state of virtual reality[J]. The Verge, 2017.
- [4] BALTRUSAITIS J. Anamorphic art. new york: Harry n. abrams [J]. Inc. Publishers, 1977.
- [5] ARTAUD A. The theatre and its double, trans[J]. Mary Caroline Richards (New York: Grove, 1958), 1958, 124.
- [6] BROCKWELL H. Forgotten genius: the man who made a working vr machine in 1957[J]. Tech Radar. Retrieved, 2016, 7.
- [7] JOSHI D, VANKA S, TAFTI D. National center for supercomputing applications[C]//Boundary Layer and Free Shear Flows: Presented at the 1994 ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting, Lake Tahoe, Nevada, June 19-23, 1994: volume 184. American Society of Mechanical Engineers, 1994: 231.
- [8] NELSON T. Report on siggraph'81[J]. Creative Computing, 1982, 8(3).
- [9] BARLOW J P. Being in nothingness[J]. Electronic manuscript. Originally, 1990.
- [10] STOKER C, BLACKMON T, HAGEN J, et al. Marsmap: An interactive virtual reality model of the pathfinder landing site[C]//Lunar and Planetary Science Conference: number 1018. 1998: 1018.
- [11] 杨青, 钟书华. 国外“虚拟现实技术发展及演化趋势”研究综述[J]. 自然辩证法通讯, 2021.
- [12] 张量, 金益, 刘媛霞, 等. 虚拟现实 (VR) 技术与发展研究综述[J]. 信息与电脑 (理论版), 2019, 17.
- [13] LINDNER P. Better, virtually: the past, present, and future of vir-

- tual reality cognitive behavior therapy[J]. International Journal of Cognitive Therapy, 2021, 14(1): 23-46.
- [14] KERSTEN T P, TSCHIRSCHWITZ F, LINDSTAEDT M, et al. The historic wooden model of solomon' s temple: 3d recording, modelling and immersive virtual reality visualisation[J]. Journal of Cultural Heritage Management and Sustainable Development, 2018.
- [15] 晏锦. 虚拟现实硬件交互设备与产品分析[J]. 信息与电脑, 2019 (13): 9-10.
- [16] 李琳, 王泊谦, 曾睿, 等. 面向虚拟环境的 VR 设备比较研究[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2018, 41(2): 169-175.
- [17] 范丽亚, 马介渊, 张克发, 等. 虚拟现实硬件产业的发展[J]. 科技导报, 2019, 37(5): 81-88.
- [18] 孙柏林. 虚拟现实技术在美国军队中的应用述评[J]. 计算机仿真, 2018, 35(1): 1-7.
- [19] 王召阳, 常家辉, 白子龙. 美军仿真技术及其应用现状分析[J]. Ordnance Industry Automation, 2021, 10(40): 10.
- [20] 李宝敏, 王钰彪, 任友群. 虚拟现实教学对学生学习成绩的影响研究——基于 40 项实验和准实验的元分析[J]. 开放教育研究, 2019, 25(4): 82-90.
- [21] 崔钰婷, 赵志群. 虚拟现实技术对学生学习绩效的影响——基于 59 项实验或准实验研究的元分析[J]. 中国远程教育, 2020.
- [22] 王金岗. 虚拟现实技术在高职实践教学中的应用研究[J]. 中国职业技术教育, 2011, 23.
- [23] SCHOTT C, MARSHALL S. Virtual reality and situated experiential education: A conceptualization and exploratory trial[J]. Journal of computer assisted learning, 2018, 34(6): 843-852.
- [24] 罗伟, 李珊珊, 田夫, 等. 虚拟现实技术在医疗中的应用[J]. 中华医院管理杂志, 2005, 21(12): 837-838.
- [25] 张艳鹏, 侯冬梅, 杨倩, 等. 基于虚拟现实技术的工业 CT 三维图像处理与展示方法[J]. 自动化与仪器仪表, 2021.
- [26] 杨亚联, 戴济顺, 谢潇. 基于虚拟现实试验场景的驾驶模拟系统研发[J]. 重庆大学学报, 2021, 44(1): 1-10.
- [27] 徐劲力, 牛强强, 陈春晓. 增强现实环境下汽车后桥虚拟拆卸系统的设计[J]. 机械设计与制造, 2021.
- [28] 王睿, 姜进章. 论虚拟现实电影中电影与游戏的边界[J]. 中州学刊, 2022, 44(02): 143-150.