



“十三五”国家重点图书出版规划项目

智能制造  
系列丛书

# 虚拟现实 与增强现实技术

赵罡 刘亚醉 韩鹏飞 肖文磊 编著



VIRTUAL REALITY  
AND AUGMENTED REALITY

清华大学出版社  
北京

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。  
版权所有,侵权必究。举报:010-62782989, beiqinquan@tup.tsinghua.edu.cn。

#### 图书在版编目(CIP)数据

虚拟现实与增强现实技术/赵罡等编著. —北京:清华大学出版社,2022.4  
(智能制造系列丛书)  
ISBN 978-7-302-59654-7

I. ①虚… II. ①赵… III. ①虚拟现实 IV. ①TP391.98

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2021)第 249684 号

责任编辑:袁琦 王华

封面设计:李召霞

责任校对:赵丽敏

责任印制:杨艳

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社总机:010-83470000 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印装者:北京嘉实印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:170mm×240mm 印 张:14.75

字 数:293 千字

版 次:2022 年 4 月第 1 版

印 次:2022 年 4 月第 1 次印刷

定 价:79.00 元

---

产品编号:079369-01

智能制造系列丛书编委会名单

主 任：

周 济

副主任：

谭建荣 李培根

委 员(按姓氏笔画排序)：

|     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|
| 王 雪 | 王飞跃 | 王立平 | 王建民 |
| 尤 政 | 尹周平 | 田 锋 | 史玉升 |
| 冯毅雄 | 朱海平 | 庄红权 | 刘 宏 |
| 刘志峰 | 刘洪伟 | 齐二石 | 江平宇 |
| 江志斌 | 李 晖 | 李伯虎 | 李德群 |
| 宋天虎 | 张 洁 | 张代理 | 张秋玲 |
| 张彦敏 | 陆大明 | 陈立平 | 陈吉红 |
| 陈超志 | 邵新宇 | 周华民 | 周彦东 |
| 郑 力 | 宗俊峰 | 赵 波 | 赵 罡 |
| 钟诗胜 | 袁 勇 | 高 亮 | 郭 楠 |
| 陶 飞 | 霍艳芳 | 戴 红 |     |

丛书编委会办公室

主 任：

陈超志 张秋玲

成 员：

|     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|
| 郭英玲 | 冯 昕 | 罗丹青 | 赵范心 |
| 权淑静 | 袁 琦 | 许 龙 | 钟永刚 |
| 刘 杨 |     |     |     |

清华大学出版社



**制**造业是国民经济的主体,是立国之本、兴国之器、强国之基。习近平总书记在党的十九大报告中号召:“加快建设制造强国,加快发展先进制造业。”他指出:“要以智能制造为主攻方向推动产业技术变革和优化升级,推动制造业产业模式和企业形态根本性转变,以‘鼎新’带动‘革故’,以增量带动存量,促进我国产业迈向全球价值链中高端。”

智能制造——制造业数字化、网络化、智能化,是我国制造业创新发展的主要抓手,是我国制造业转型升级的主要路径,是加快建设制造强国的主攻方向。

当前,新一轮工业革命方兴未艾,其根本动力在于新一轮科技革命。21 世纪以来,互联网、云计算、大数据等新一代信息技术飞速发展。这些历史性的技术进步,集中汇聚在新一代人工智能技术的战略性突破,新一代人工智能已经成为新一轮科技革命的核心技术。

新一代人工智能技术与先进制造技术的深度融合,形成了新一代智能制造技术,成为新一轮工业革命的核心驱动力。新一代智能制造的突破和广泛应用将重塑制造业的技术体系、生产模式、产业形态,实现第四次工业革命。

新一轮科技革命和产业变革与我国加快转变经济发展方式形成历史性交汇,智能制造是一个关键的交汇点。中国制造业要抓住这个历史机遇,创新引领高质量发展,实现向世界产业链中高端的跨越发展。

智能制造是一个“大系统”,贯穿于产品、制造、服务全生命周期的各个环节,由智能产品、智能生产及智能服务三大功能系统以及工业物联网和智能制造云两大支撑系统集成而成。其中,智能产品是主体,智能生产是主线,以智能服务为中心的产业模式变革是主题,工业物联网和智能制造云是支撑,系统集成将智能制造各功能系统和支撑系统集成成为新一代智能制造系统。

智能制造是一个“大概念”,是信息技术与制造技术的深度融合。从 20 世纪中叶到 90 年代中期,以计算、感知、通信和控制为主要特征的信息化催生了数字化制造;从 90 年代中期开始,以互联网为主要特征的信息化催生了“互联网+制造”;当前,以新一代人工智能为主要特征的信息化开创了新一代智能制造的新阶段。

这就形成了智能制造的三种基本范式,即:数字化制造(digital manufacturing)——第一代智能制造;数字化网络化制造(smart manufacturing)——“互联网+制造”或第二代智能制造,本质上是“互联网+数字化制造”;数字化网络化智能化制造(intelligent manufacturing)——新一代智能制造,本质上是“智能+互联网+数字化制造”。这三个基本范式次第展开又相互交织,体现了智能制造的“大概念”特征。

对中国而言,不必走西方发达国家顺序发展的老路,应发挥后发优势,采取三个基本范式“并行推进、融合发展”的技术路线。一方面,我们必须实事求是,因企制宜、循序渐进地推进企业的技术改造、智能升级,我国制造企业特别是广大中小企业还远远没有实现“数字化制造”,必须扎扎实实完成数字化“补课”,打好数字化基础;另一方面,我们必须坚持“创新引领”,可直接利用互联网、大数据、人工智能等先进技术,“以高打低”,走出一条并行推进智能制造的新路。企业是推进智能制造的主体,每个企业要根据自身实际,总体规划、分步实施、重点突破、全面推进,产学研协调创新,实现企业的技术改造、智能升级。

未来20年,我国智能制造的发展总体将分成两个阶段。第一阶段:到2025年,“互联网+制造”——数字化网络化制造在全国得到大规模推广应用;同时,新一代智能制造试点示范取得显著成果。第二阶段:到2035年,新一代智能制造在全国制造业实现大规模推广应用,实现中国制造业的智能升级。

推进智能制造,最根本的要靠“人”,动员千军万马、组织精兵强将,必须以人为本。智能制造技术的教育和培训,已经成为推进智能制造的当务之急,也是实现智能制造的最重要的保证。

为推动我国智能制造人才培养,中国机械工程学会和清华大学出版社组织国内知名专家,经过三年的扎实工作,编著了“智能制造系列丛书”。这套丛书是编著者多年研究成果与工作经验的总结,具有很高的学术前瞻性与工程实践性。丛书主要面向从事智能制造的工程技术人员,亦可作为研究生或本科生的教材。

在智能制造急需人才的关键时刻,及时出版这样一套丛书具有重要意义,为推动我国智能制造发展做出了突出贡献。我们衷心感谢各位作者付出的心血和劳动,感谢编委会全体同志的不懈努力,感谢中国机械工程学会与清华大学出版社的精心策划和鼎力投入。

衷心希望这套丛书在工程实践中不断进步、更精更好,衷心希望广大读者喜欢这套丛书、支持这套丛书。

让我们大家共同努力,为实现建设制造强国的中国梦而奋斗。

周济

2019年3月

技 术进展之快,市场竞争之烈,大国较劲之剧,在今天这个时代体现得淋漓尽致。

世界各国都在积极采取行动,美国的“先进制造伙伴计划”、德国的“工业 4.0 战略计划”、英国的“工业 2050 战略”、法国的“新工业法国计划”、日本的“超智能社会 5.0 战略”、韩国的“制造业创新 3.0 计划”,都将发展智能制造作为本国构建制造业竞争优势的关键举措。

中国自然不能成为这个时代的旁观者,我们无意较劲,只想通过合作竞争实现国家崛起。大国崛起离不开制造业的强大,所以中国希望建成制造强国、以制造而强国,实乃情理之中。制造强国战略之主攻方向和关键举措是智能制造,这一点已经成为中国政府、工业界和学术界的共识。

制造企业普遍面临着提高质量、增加效率、降低成本和敏捷适应广大用户不断增长的个性化消费需求,同时还需要应对进一步加大的资源、能源和环境等约束之挑战。然而,现有制造体系和制造水平已经难以满足高端化、个性化、智能化产品与服务的需求,制造业进一步发展所面临的瓶颈和困难迫切需要制造业的技术创新和智能升级。

作为先进信息技术与先进制造技术的深度融合,智能制造的理念和技术贯穿于产品设计、制造、服务等全生命周期的各个环节及相应系统,旨在不断提升企业的产品质量、效益、服务水平,减少资源消耗,推动制造业创新、绿色、协调、开放、共享发展。总之,面临新一轮工业革命,中国要以信息技术与制造业深度融合为主线,以智能制造为主攻方向,推进制造业的高质量发展。

尽管智能制造的大潮在中国滚滚而来,尽管政府、工业界和学术界都认识到智能制造的重要性,但是不得不承认,关注智能制造的大多数人(本人自然也在其中)对智能制造的认识还是片面的、肤浅的。政府勾画的蓝图虽气势磅礴、宏伟壮观,但仍有很多实施者感到无从下手;学者们高谈阔论的宏观理念或基本概念虽至关重要,但如何见诸实践,许多人依然不得要领;企业的实践者们侃侃而谈的多是当年制造业信息化时代的陈年酒酿,尽管依旧散发清香,却还是少了一点智能制造的

气息。有些人看到“百万工业企业上云,实施百万工业 APP 培育工程”时劲头十足,可真准备大干一场的时候,又仿佛云里雾里。常常听学者们言,CPS(cyber-physical systems,信息-物理系统)是工业 4.0 和智能制造的核心要素,CPS 万不能离开数字孪生体(digital twin)。可数字孪生体到底如何构建?学者也好,工程师也好,少有人能够清晰道来。又如,大数据之重要性日渐为人们所知,可有了数据后,又如何分析?如何从中提炼知识?企业人士鲜有知其个中究竟的。至于关键词“智能”,什么样的制造真正是“智能”制造?未来制造将“智能”到何种程度?解读纷纷,莫衷一是。我的一位老师,也是真正的智者,他说:“智能制造有几分能说清楚?还有几分是糊里又糊涂。”

所以,今天中国散见的学者高论和专家见解还远不能满足智能制造相关的研究者和实践者们之所需。人们既需要微观的深刻认识,也需要宏观的系统把握;既需要实实在在的智能传感器、控制器,也需要看起来虚无缥缈的“云”;既需要对理念和本质的体悟,也需要对可操作性的明晰;既需要互联的快捷,也需要互联的标准;既需要数据的通达,也需要数据的安全;既需要对未来的前瞻和追求,也需要对当下的实事求是……如此等等。满足多方位的需求,从多视角看智能制造,正是这套丛书的初衷。

为助力中国制造业高质量发展,推动我国走向新一代智能制造,中国机械工程学会和清华大学出版社组织国内知名的院士和专家编写了“智能制造系列丛书”。本丛书以智能制造为主线,考虑智能制造“新四基”[即“一硬”(自动控制和感知硬件)、“一软”(工业核心软件)、“一网”(工业互联网)、“一台”(工业云和智能服务平台)]的要求,由 30 个分册组成。除《智能制造:技术前沿与探索应用》《智能制造标准化》《智能制造实践》3 个分册外,其余包含了以下五大板块:智能制造模式、智能设计、智能传感与装备、智能制造使能技术以及智能制造管理技术。

本丛书编著者包括高校、工业界拔尖的带头人和奋战在一线的科研人员,有着丰富的智能制造相关技术的科研和实践经验。虽然每一位作者未必对智能制造有全面认识,但这个作者群体的知识对于试图全面认识智能制造或深刻理解某方面技术的人而言,无疑能有莫大的帮助。本丛书面向从事智能制造工作的工程师、科研人员、教师和研究生,兼顾学术前瞻性和对企业的指导意义,既有对理论和方法的描述,也有实际应用案例。编著者经过反复研讨、修订和论证,终于完成了本丛书的编写工作。必须指出,本丛书肯定不是完美的,或许完美本身就不存在,更何况智能制造大潮中学界和业界的急迫需求也不能等待对完美的寻求。当然,这也不能成为掩盖丛书存在缺陷的理由。我们深知,疏漏和错误在所难免,在这里也希望同行专家和读者对本丛书批评指正,不吝赐教。

在“智能制造系列丛书”编写的基础上,我们还开发了智能制造资源库及知识服务平台,该平台以用户需求为中心,以专业知识内容和互联网信息搜索查询为基础,为用户提供有用的信息和知识,打造智能制造领域“共创、共享、共赢”的学术生

态圈和教育教学系统。

我非常荣幸为本丛书写序,更乐意向全国广大读者推荐这套丛书。相信这套丛书的出版能够促进中国制造业高质量发展,对中国的制造强国战略能有特别的意义。丛书编写过程中,我有幸认识了很多朋友,向他们学到很多东西,在此向他们表示衷心感谢。

需要特别指出,智能制造技术是不断发展的。因此,“智能制造系列丛书”今后还需要不断更新。衷心希望,此丛书的作者们及其他的智能制造研究者和实践者们贡献他们的才智,不断丰富这套丛书的内容,使其始终贴近智能制造实践的需求,始终跟随智能制造的发展趋势。



2019年3月

清华大学出版社



虚拟现实技术和增强现实技术为制造业中的产品设计、智能制造、测量装配等环节提供了新工具和新方法,对促进现代制造业的转型升级显示出巨大潜力。笔者自 2002 年在国外从事博士后研究时开始接触虚拟现实技术,回国以后又在姚福生院士支持下,得以持续开展研究。近年来课题组依托北京航空航天大学“虚拟现实技术与系统国家重点实验室”和“航空高端装备智能制造技术工信部重点实验室”,围绕虚拟现实技术和增强现实关键核心技术及其在智能制造领域的应用开展了积极探索,与航空航天等龙头企业合作,承担和参与了多项国家级和省部级项目,积累了一些应用体会。

本书对虚拟现实技术和增强现实技术理论及其在制造领域的应用进行了由浅入深的介绍,并结合课题组多年的项目开发经验给出了一些实际应用案例。主要内容如下。第 1 章描述了虚拟现实技术和增强现实技术的发展历史以及国内外的研究现状,并对虚拟现实和增强现实系统进行了分类说明,最后对虚拟现实技术和增强现实技术在不同领域的应用进行了概述。第 2 章阐述了模型的表达方式和工业交换标准,并对虚拟现实技术和增强现实技术中采用的图形绘制技术进行了介绍。第 3 章对航空航天智能制造领域经常涉及的大规模 CAD 模型的绘制关键技术进行了重点论述,分别阐述了大规模 CAD 模型的预处理方法、模型剔除和自适应绘制、数据压缩和实时绘制以及沉浸式绘制技术。第 4 章简要介绍了增强现实技术使用的摄像机模型和投影变换,重点阐述了三维跟踪注册技术。第 5 章针对工业制造场景缺乏纹理注册特征的难题,重点阐述了课题组在基于直线特征和轮廓特征的三维注册技术所做的工作。第 6 章对虚拟现实技术和增强现实技术开发过程中常用的内核引擎和开发平台进行了介绍,基于此可以快速地开发虚拟现实和增强现实原型系统。第 7 章介绍了虚拟现实技术和增强现实技术在数字孪生中的应用,提供了课题组实施的 3 个典型案例,案例在国内航空企业进行了验证。第 8 章对虚拟现实技术和增强现实技术在制造领域不同环节的应用进行了介绍。

全书由赵罡和肖文磊负责整体策划和编写,刘亚醉负责第 2、3、7 章内容以及第 1、6、8 章部分内容撰写,韩鹏飞负责第 4、5 章内容以及第 1、6、8 章部分内容撰

写。书中部分内容涉及一些课题组已经毕业的博士生的论文工作,包括谈敦铭、薛俊杰、曹宪、戴晟等,在此一并感谢。全书书稿由刘亚醉进行统一整理和编辑。

虚拟现实与增强现实技术发展快,涵盖范围广,相关的书籍也有很多。本书涉及的只是其在智能制造中的一部分典型应用技术,管中窥豹,算是抛砖引玉。虽然笔者尽了很大努力,但水平所限,不妥之处仍在所难免,敬请同行专家学者和广大读者批评指正。

特别感谢虚拟现实技术与系统国家重点实验室赵沁平院士对课题组长期以来的指导和支持!感谢中国商飞北研中心许澍虹研究员为本书提供的部分技术资料 and 长期以来的深度合作与支持!同时也感谢清华大学出版社责任编辑袁琦和王华两位老师的辛勤付出!

赵 昱

2021年10月



|                        |     |
|------------------------|-----|
| <b>第 1 章 绪论</b>        | 001 |
| 1.1 VR 与 AR 的概念        | 001 |
| 1.1.1 VR 与 AR 的定义      | 001 |
| 1.1.2 VR 与 AR 的发展简史    | 002 |
| 1.1.3 VR 和 AR 的研究现状    | 008 |
| 1.1.4 VR 与 AR 的联系与区别   | 012 |
| 1.2 VR 与 AR 的系统组成与分类   | 013 |
| 1.2.1 VR 系统组成          | 013 |
| 1.2.2 VR 系统分类          | 014 |
| 1.2.3 VR 系统硬件设备        | 015 |
| 1.2.4 AR 系统组成          | 026 |
| 1.2.5 AR 系统分类          | 026 |
| 1.2.6 AR 系统硬件设备        | 027 |
| 1.3 VR 技术与 AR 技术的应用领域  | 029 |
| 1.3.1 VR 技术的应用         | 029 |
| 1.3.2 AR 技术的应用         | 033 |
| 参考文献                   | 034 |
| <b>第 2 章 虚拟现实图形学基础</b> | 039 |
| 2.1 模型表达和交换            | 039 |
| 2.1.1 模型表达             | 039 |
| 2.1.2 模型交换             | 046 |
| 2.2 绘制基本原理             | 047 |
| 2.2.1 模型几何变换           | 047 |
| 2.2.2 空间投影             | 053 |

|              |                           |            |
|--------------|---------------------------|------------|
| 2.2.3        | 光照模型                      | 054        |
| 2.2.4        | 着色器                       | 058        |
| 2.2.5        | 纹理映射                      | 060        |
| 2.3          | 高级绘制技术                    | 062        |
| 2.3.1        | 模型简化与 LOD 技术              | 062        |
| 2.3.2        | 光线追踪                      | 064        |
| 2.3.3        | 粒子系统                      | 065        |
| 2.3.4        | 环境映射                      | 068        |
| 2.3.5        | 光子映射                      | 070        |
|              | 参考文献                      | 071        |
| <b>第 3 章</b> | <b>大数据量几何模型的绘制</b>        | <b>074</b> |
| 3.1          | 大规模复杂 CAD 模型的预处理方法        | 074        |
| 3.1.1        | 大规模 CAD 面片模型的场景组织结构       | 075        |
| 3.1.2        | 具有模型装配层次信息的 BVH 构建方法      | 077        |
| 3.1.3        | 面向 GPU 的模型数据高效压缩算法        | 079        |
| 3.1.4        | 实例分析                      | 081        |
| 3.2          | 基于模型度量的可见性剔除和 LOD 自适应绘制算法 | 084        |
| 3.2.1        | 模型剔除                      | 085        |
| 3.2.2        | 模型度量                      | 087        |
| 3.2.3        | 基于模型度量的可见性剔除              | 093        |
| 3.2.4        | 基于模型度量的 LOD 自适应绘制         | 098        |
| 3.2.5        | 实例分析                      | 099        |
| 3.3          | 基于小波的多分辨率稀疏体素数据压缩和实时绘制算法  | 102        |
| 3.3.1        | 背景介绍                      | 103        |
| 3.3.2        | 基于小波的稀疏体素绘制属性压缩           | 105        |
| 3.3.3        | 基于小波的稀疏体素实时绘制算法           | 109        |
| 3.3.4        | 实例测试                      | 112        |
| 3.4          | 沉浸式环境立体绘制优化               | 116        |
| 3.4.1        | 背景介绍                      | 117        |
| 3.4.2        | 基于单相机视觉的头部位置跟踪            | 119        |
| 3.4.3        | 头部和视点的位移映射                | 120        |
| 3.4.4        | 左右立体图像的快速生成               | 121        |
| 3.4.5        | 实例分析                      | 123        |
|              | 参考文献                      | 127        |
| <b>第 4 章</b> | <b>增强现实三维注册基础</b>         | <b>131</b> |
| 4.1          | 摄像机模型                     | 131        |

|              |                             |            |
|--------------|-----------------------------|------------|
| 4.1.1        | 坐标系定义                       | 131        |
| 4.1.2        | 坐标系转换                       | 131        |
| 4.1.3        | 摄像机标定                       | 133        |
| 4.2          | 透视投影                        | 134        |
| 4.2.1        | 投影变换                        | 134        |
| 4.2.2        | 投影不变量                       | 135        |
| 4.3          | 三维注册                        | 136        |
| 4.3.1        | 基于硬件传感器的跟踪注册                | 136        |
| 4.3.2        | 基于二维标识的跟踪注册                 | 137        |
| 4.3.3        | 基于自然特征的无标识跟踪注册              | 139        |
|              | 参考文献                        | 143        |
| <b>第 5 章</b> | <b>面向制造场景的增强现实三维注册</b>      | <b>147</b> |
| 5.1          | 基于线条特征的三维注册相关研究             | 147        |
| 5.1.1        | 基于线条形状                      | 147        |
| 5.1.2        | 基于硬件传感器                     | 148        |
| 5.1.3        | 基于拓扑结构                      | 148        |
| 5.2          | 基于直线条特征与移动设备传感器的初始化注册方法     | 149        |
| 5.2.1        | 基于移动设备传感器的旋转矩阵求解            | 149        |
| 5.2.2        | 基于线条匹配的平移向量求解               | 151        |
| 5.2.3        | 三维空间竖直线提取                   | 153        |
| 5.2.4        | 实例分析                        | 154        |
| 5.3          | 基于直线条特征的位姿实时跟踪方法            | 156        |
| 5.3.1        | RAPiD 方法                    | 156        |
| 5.3.2        | 问题与改进                       | 157        |
| 5.3.3        | 基于直线条特征的位姿实时跟踪方法            | 158        |
| 5.3.4        | 实例分析                        | 159        |
| 5.4          | 基于轮廓特征的初始化注册方法              | 160        |
| 5.4.1        | 轮廓提取与预定位                    | 160        |
| 5.4.2        | 旋转矩阵求解                      | 162        |
| 5.4.3        | 平移参数校正                      | 164        |
| 5.4.4        | 实例分析                        | 165        |
| 5.5          | 基于一般线条特征与 VI-SLAM 的位姿实时跟踪方法 | 168        |
| 5.5.1        | RAPiD 方法优化                  | 168        |
| 5.5.2        | 基于线条特征与 VI-SLAM 的混合跟踪       | 169        |
| 5.5.3        | 实例分析                        | 169        |
| 5.6          | 基于线条特征的增强现实装配辅助原型系统         | 170        |
| 5.6.1        | 基于移动终端触控交互的线条模型及控制点自动提取     | 170        |

|              |                          |            |
|--------------|--------------------------|------------|
| 5.6.2        | 基于线条模型引导的快速准确初始化         | 170        |
| 5.6.3        | 原型系统                     | 171        |
|              | 参考文献                     | 172        |
| <b>第 6 章</b> | <b>内核引擎与开发平台</b>         | <b>174</b> |
| 6.1          | 内核引擎                     | 174        |
| 6.1.1        | 几何造型内核                   | 174        |
| 6.1.2        | 绘制引擎                     | 175        |
| 6.1.3        | 动力学引擎                    | 178        |
| 6.2          | 开发平台                     | 179        |
| 6.2.1        | Unity 3D                 | 179        |
| 6.2.2        | Unreal Engine            | 179        |
| 6.2.3        | Metaio                   | 179        |
| 6.2.4        | Vuforia                  | 180        |
| 6.2.5        | ARKit                    | 180        |
|              | 参考文献                     | 180        |
| <b>第 7 章</b> | <b>VR/AR 与数字孪生</b>       | <b>182</b> |
| 7.1          | 数字孪生简介                   | 182        |
| 7.1.1        | 数字孪生的发展历程                | 182        |
| 7.1.2        | 数字孪生在制造中的应用              | 183        |
| 7.2          | 典型案例：数控加工中的数字孪生 + VR 技术  | 184        |
| 7.2.1        | 数字孪生系统总体架构               | 184        |
| 7.2.2        | 加工过程几何仿真算法               | 185        |
| 7.2.3        | 离散几何模型的三维可视化             | 189        |
| 7.2.4        | 验证环境和典型零件                | 191        |
| 7.3          | 典型案例：飞机装配中的数字孪生 + AR 技术  | 193        |
| 7.3.1        | 基于 AR 的线缆接头装配过程可视化       | 193        |
| 7.3.2        | 基于 AR 的支架安装状态检测          | 195        |
| 7.3.3        | 基于云服务的装配状态监控集成控制系统       | 197        |
| 7.4          | 典型案例：发动机装配中的数字孪生 + VR 技术 | 197        |
| 7.4.1        | 多元传感融合测量系统               | 198        |
| 7.4.2        | 发动机装配信息融合与可视化软件系统        | 199        |
|              | 参考文献                     | 200        |
| <b>第 8 章</b> | <b>VR/AR 在制造领域中的应用</b>   | <b>202</b> |
| 8.1          | 产品设计                     | 202        |

|       |           |     |
|-------|-----------|-----|
| 8.1.1 | 虚拟设计      | 202 |
| 8.1.2 | 虚拟样机      | 202 |
| 8.2   | 运营管理      | 203 |
| 8.2.1 | 生产系统的运行仿真 | 203 |
| 8.2.2 | 数字工厂      | 203 |
| 8.3   | 制造过程      | 203 |
| 8.3.1 | 增材制造      | 203 |
| 8.3.2 | 虚拟装配与维修   | 204 |
| 8.3.3 | 质量检测      | 206 |
| 8.3.4 | 工业仿真      | 207 |
|       | 参考文献      | 214 |

清华大学出版社

## 1.1 VR 与 AR 的概念

### 1.1.1 VR 与 AR 的定义

虚拟现实(virtual reality, VR)技术是一种利用计算机技术模拟生成三维空间虚拟环境,并为用户提供多种逼真的感官体验(包括视觉、听觉、触觉等)的真实感模拟技术。虚拟现实技术作为仿真技术的一个重要分支,综合了多种现代科学技术,包括计算机图形学、互联网技术、人机接口技术、多媒体技术等,是一门具有挑战性的交叉科学技术。虚拟现实环境能够为用户提供与真实环境高度相似的体验,仿佛身临其境一般。除此之外,用户借助于头戴式设备、触觉手套等外部设备,可以与虚拟现实环境进行实时交互,动态改变虚拟现实场景,实时接收虚拟现实环境提供的多种类型的反馈,从而更进一步地提高用户在虚拟现实环境中的体验。

虚拟现实需要具备的三个特征包括:沉浸感(immersion)、交互性(interactivity)和想象力(imagination),也称为虚拟现实的 3I 特征(I 为描述 3 个特征的英文词汇的首字母)<sup>[1]</sup>。

#### 1. 沉浸感

沉浸感主要描述的是用户在虚拟现实环境下的真实感程度。理想的虚拟现实环境应当具有高度的沉浸感,让用户无法分清楚虚拟环境与真实环境,使其在虚拟环境中的感受与在真实环境中的感受一致,使得用户能够全身心地 in 虚拟现实环境中进行操作。

#### 2. 交互性

交互性是指用户能够在虚拟环境中对物体进行操作,并且得到操作反馈。交互性涉及虚拟环境中的对象在真实环境中物理现象的模拟,用户对物体的操作必须符合现实世界的物理规律,否则会给用户造成对周围环境理解的困扰。除此之外,实时性是衡量交互性好坏的主要指标之一。实时性越高,在与虚拟场景进行交互时感受的延迟越小,用户体验就越好,反之亦然。

### 3. 想象力

想象力指的是用户在虚拟现实环境中应当具备高度灵活、可扩展的想象空间。虚拟现实除了对真实环境的模拟之外,还允许用户在虚拟现实环境中进行想象,构造一些现实环境下不存在的场景,能够让用户从想象的环境中获取现实环境下无法获得的知识,从而提高人类对现实环境的认知。



图 1-1 增强现实实例

增强现实(augmented reality, AR)技术是一种实时地计算摄像机的位置及姿态并在摄像机捕捉到的真实场景的画面上叠加相应虚拟信息的技术。它将虚拟信息(包括计算机生成的图形、文字、声音、动画等)实时地叠加到由相机捕捉到的现实画面之上,以达到对真实世界进行增强的目的。如图 1-1 所示,一个虚拟花盆被叠加渲染到一幅图像之上,该图像是由相机拍摄得到的真实世界图像,通过调整虚拟花盆的渲染位姿和尺度,可以在视觉上给人一种“虚拟花盆存在于真实世界中”的逼真体验,达到虚实融合效果。

### 1.1.2 VR 与 AR 的发展简史

虚拟现实技术的发展经历 4 个阶段:

#### 1. 探索阶段(20 世纪 30 年代—60 年代)

虚拟现实这个词语最早出现在 20 世纪 30 年代斯坦利·G. 温鲍姆(Stanley G. Weinbaum)的科幻小说《皮格马利翁的眼镜》<sup>[2]</sup>中,该书被认为是探索虚拟现实的第一部科幻作品。该书介绍了以全息护目镜为基础的虚拟现实系统。

20 世纪 50 年代,由电影摄影师莫顿·海利希(Morton Heiling)构想并创造了一个能够为人类所有感官提供体验的设备,并于 1962 年制造了首个原型系统,如图 1-2 所示,命名为“Sensorama”<sup>[3]</sup>,该设备在播放影片时能够同时为人类带来视觉、听觉、嗅觉、触觉的体验。他以驾驶直升机、骑自行车等运动体验为基础制作了 5 部电影。但是受限于当时人类的认知水平,并没有人能够认识到这是一项革命性技术。

1960 年,莫顿·海利希发明了第一款头戴式显示器(head mounted display, HMD)——球形电子眼罩(telesphere mask)<sup>[4]</sup>,如图 1-3 所示,并注册了专利。该设备能够进行 3D 显示,并提供立体声。但是该设备无法进行交互,且缺少运动追踪功能。

1961 年,两位美国飞歌(Philco)公司的工程师开发出了首款具有运动追踪系



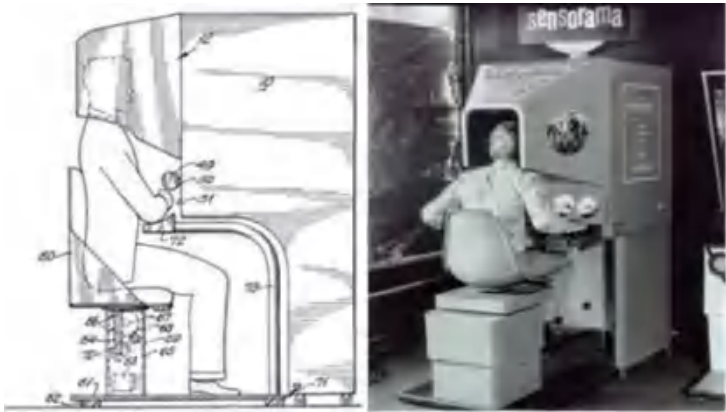


图 1-2 Sensorama 设备<sup>[3]</sup>

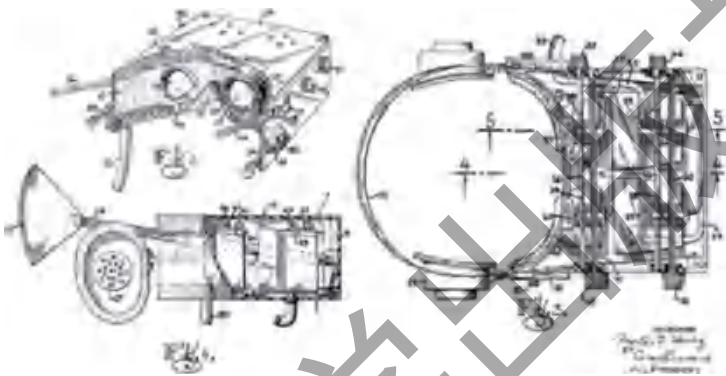


图 1-3 球形电子眼罩设备设计图<sup>[4]</sup>

统的 HMD——headsight<sup>[5]</sup>,该设备为每一只眼睛提供单独的显示屏幕和运动追踪系统,允许用户通过转动头部观察周围环境。该设备的设计初衷并非应用于虚拟现实,而是用于美国军方以沉浸式方式远程查看危险情况。该设备以闭路摄像机作为视频输入,缺乏计算机图形生成功能的集成。

1968 年,计算机图形学之父伊凡·苏泽兰(Ivan Sutherland)开发了世界上第一台计算机图形驱动的虚拟现实头戴式设备<sup>[6]</sup>,该设备包含了头部位置追踪系统,如图 1-4 所示。受限于当时不成熟的软硬件设备,该设备过于沉重,在使用时不得不悬吊在房顶上,它也被后人称为“达摩克利斯之剑”。



图 1-4 伊凡·苏泽兰与他的“达摩克利斯之剑”<sup>[6]</sup>

## 2. 萌芽阶段(20 世纪 70 年代—80 年代)

1971 年,弗里德里克·布罗克斯研制了一款具有力反馈功能的原型系统——Gropo-Ⅱ<sup>[7]</sup>。用户可以借助一个外部操作器对虚拟环境中的对象进行移动、抓取等操作,并且可通过传感器让用户感受到被操作物体的重量。

1974 年,迈伦·克鲁格建立了一个名为 Videoplace 的实验室<sup>[8]</sup>,旨在让用户在不借助任何外部设备的情况下与虚拟环境交互。该系统还允许位于不同地方的用户在虚拟环境下进行通信。用户面对投影屏幕,通过摄像机拍摄用户的轮廓,与计算机生成的图形进行融合,然后再投影至屏幕上,通过传感器捕捉识别用户的身体姿态,可以在屏幕上显示爬山、游泳等情境,如图 1-5 所示。

1978 年,麻省理工学院创建了阿斯彭电影地图(Aspen Movie Map)项目<sup>[9]</sup>,该项目通过采集阿斯彭城市每个季节各个城市街道的图片,经过计算机处理之后,为用户提供三种虚拟交互模式:夏季、冬季和三维模式。通过该系统,用户仿佛置身于阿斯彭城市,能够足不出户地浏览城市街景,如图 1-6 所示。



图 1-5 Videoplace 虚拟交互场景<sup>[8]</sup>

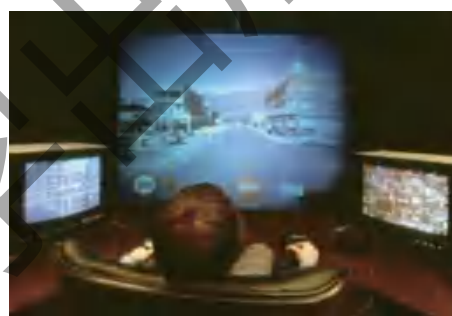


图 1-6 阿斯彭电影地图项目<sup>[9]</sup>

1983 年,美国国防部(United States Department of Defense)制定了广域网仿真技术研究计划,随后美国硅图(SGI)公司开发了网络虚拟现实游戏空战(DogFlight)。

1985 年,美国航空航天管理局 NASA 的斯科特·费舍尔(Scott Fisher)研发了数据手套(data glove)<sup>[10]</sup>。数据手套是一种轻柔的、可穿戴的手套装置,可以测量手掌的弯曲程度、关节的动作以及手指的分合等,通过计算机编程能够操控数据手套实现特定的功能。数据手套是虚拟现实外设最早的原型,与之原理类似的还有数据衣。

1986 年,斯科特·费舍尔研发了第一套基于头盔和数据手套的 VR 系统虚拟交互环境工作站(virtual interactive environment workstation, VIEW)<sup>[10]</sup>。这是第一款相对完整的 VR 系统,不仅能够通过头戴设备进行沉浸式的体验,还可以通过外部设备进行场景交互,被应用到了科学数据可视化、空间技术等领域。

1987 年,可视化编程实验室(visual programming lab, VPL)的贾瑞恩·拉尼

尔(Jaron Lanier)<sup>[11]</sup>使得“虚拟现实”广为人知,至此虚拟现实成为计算机领域主要的研究方向之一。VPL 研发了多种与虚拟现实相关的产品,包含数据手套、数据衣、眼镜电话、音量控制软件等,如图 1-7 所示。VPL 成为第一家销售虚拟现实设备的公司。



图 1-7 VPL 虚拟现实产品<sup>[11]</sup>

### 3. 发展阶段(20 世纪 90 年代—21 世纪初)

1991 年,世嘉(SEGA)公司发行了世嘉虚拟现实(SEGA VR)耳机街机游戏和世嘉驱动器(Mega Drive)<sup>[12]</sup>。配备液晶显示屏、立体耳机和惯性传感器,能够追踪用户的头部运动,如图 1-8 所示。同时,推出了虚拟游戏,成为全球第一大的多人虚拟现实游戏平台。然而由于技术的限制,SEGA 公司宣布该设备将永久处于原型阶段。现在看来,这无疑是 SEGA 公司的重大决策失败。



图 1-8 世嘉虚拟现实设备<sup>[12]</sup>

1991 年,Virtuality Group 推出了一系列街机游戏和设备<sup>[13]</sup>,如图 1-9 所示,玩家通过佩戴一套 VR 眼镜,能够在游戏机上体验沉浸式游戏,设备延迟低于 50ms,同时,不同的设备能够借助于网络进行互联,从而为玩家带来多人游戏的体验。



图 1-9 Virtuality Group 虚拟现实设备<sup>[13]</sup>

1992年,卡罗莱纳·克鲁丝-内拉(Carolina Cruz-Neira)开发了大型VR系统——沉浸式投影(洞穴式自动虚拟系统,cave automatic virtual environment, CAVE)<sup>[14]</sup>,这是一种基于投影的虚拟现实系统,并在国际图形学会议上受到广泛关注。CAVE系统一般由4个投影屏幕组成,4个投影屏幕构成一个立方体结构,用户正前方、左侧和右侧采用背投投影方式,底面采用正投投影方式。通过高性能工作站向投影屏幕交替显示计算机生成的立体图像,观察者佩戴立体眼镜和一种六自由度的头部跟踪设备,将观察者的视点位置实时地反馈到工作站中,进而动态地调整投影画面的位置,提升观察者的真实感体验。



图 1-10 Virtual Boy 游戏机<sup>[15]</sup>

1995年,任天堂发布了Virtual Boy虚拟现实游戏机<sup>[15]</sup>,如图1-10所示。它被认为是第一款能够显示立体3D图形的游戏机。Virtual Boy配备一个能够显示3D图形的视频头戴显示器,通过视差的方式使人产生一种十分真实的深度幻觉,该设备还配备了一个控制器用于玩家与虚拟环境的交互。任天堂公司承诺该设备能够进行多人游戏,但是由于多种原因,多人游戏一直没有发布。此外,该设备存在定价过高、3D效果不够优秀、便携性差等问题而没有完成指定销售量,最终被任天堂公司下架。

1996年,世界首次虚拟现实博览会在伦敦开幕,这是一场没有场地、没有真实展品的虚拟博览会,用户可以通过互联网在全球各个角落观看这次博览会,浏览虚拟展品。

#### 4. 成熟阶段(21世纪初至今)

在进入21世纪之后,随着计算机技术的飞速发展,虚拟现实技术在软件和硬件方面都得到了较快提升,使得基于大型数据的声音和图像实时动画制作成为可能,极大地推动了虚拟现实技术在各行各业的应用。此外,多种新型实用的输入输出设备不断地出现,也为虚拟现实技术的生态构造补上了重要的一环。

在软件方面,以计算机图形学为基础的现代计算机绘制技术极大地提升了用户在虚拟现实环境中的真实感体验。这些技术包括:光线追踪(ray tracing)、光线投射(ray casting)、抗锯齿(anti-aliasing)、环境遮罩(ambient occlusion)、光子映射(photon mapping)等。尤其是随着英伟达公司在1999年8月发布了NVIDIA GeForce 256第一款现代意义上的显卡,以图形处理单元(graphics processing unit, GPU)为基础的绘制技术使得虚拟现实场景在真实感绘制方面有了更进一步的提升。

在硬件方面,许多商业化虚拟现实穿戴式设备逐步走进了人类的生活中。

2012年,Oculus Rift头戴式设备<sup>[15]</sup>在众筹网站Kickstarter上线,如图1-11



所示,仅用3天时间就筹集到100万美元,首轮融资1600万美元。2013年推出了开发者版本<sup>[16]</sup>,并发布了20余款虚拟现实游戏。2014年,Facebook以20亿美元收购Oculus公司。2016年,推出了Oculus Rift CV1消费者版本。2018年推出了Oculus Go,配备宽四边形高清晰度(wide quad high definition, WQHD)显示屏,具有立体声效果,能够提供数千款VR游戏和全景视频体验。2020年,推出了第二代Oculus Quest,在渲染性能上进一步提升,单眼分辨率达到了 $1832 \times 1920$ 像素,显示屏刷新率达到90Hz,而且更轻,仅重503g。

2014年,谷歌推出了纸板眼镜Cardboard<sup>[17]</sup>,如图1-12所示,该项目是谷歌工程师花费6个月时间打造出来的实验项目,旨在打造一款将智能手机变成虚拟现实设备的原型设备。该设备售价仅15美元,用户也可以下载谷歌提供的图纸自己制作一个Cardboard。该设备为虚拟现实的普及打下了非常广泛的群众基础。



图 1-11 Oculus Rift 头戴式设备<sup>[15]</sup>



图 1-12 纸板眼镜<sup>[17]</sup>

2016年,谷歌公司发布了Daydream虚拟现实平台<sup>[18]</sup>,同时发布了对应的解决方案,包含头戴式设备(图1-13)和遥控器的设计方案、手机硬件认证和应用商店开发等。兼容Daydream规范的手机标识为“Daydream-ready”。Daydream平台是在开源手机操作系统安卓(Android)的基础之上建立起来的,该平台实际上是为VR应用的开发提供了一套开发标准,为虚拟现实的规范化提供了一个参考。



图 1-13 Daydream 头戴式设备<sup>[18]</sup>

增强现实起步稍晚。如图1-14所示,1968年伊凡·苏泽兰创建了第一个增强现实原型系统,它使用一个光学透视式头盔显示器,通过两个六自由度的跟踪器进行跟踪注册,但由于当时计算机处理性能的限制,只能实时显示非常简单的线框模型<sup>[19]</sup>。1992年,“增强现实”一词首次由波音公司在其设计的辅助布线系统中提出<sup>[20]</sup>。汤姆·考德尔(Tom Caudell)和戴维·米泽尔(David Mizell)认为,相比于虚拟现实,增强现实因为不需要对整个场景都进行渲染绘制,因此在算力和资源消耗上更具优势,但同时为了使虚实融合的精度更高、效果更逼真,对实时三维注册技术的要求更高了。1994年,保罗·米尔格拉姆(Paul Milgram)和岸野文雄(Fumio Kishino)提出了“现实——虚拟连续统一体”,描述了从真实环

境到虚拟环境的跨度,真实场景和虚拟场景分布在两端,在这两者之间接近虚拟场景的是增强虚拟,接近真实环境的是增强现实,位于中间的部分统称为混合现实<sup>[21]</sup>。1997年,拉纳尔多·阿祖马(Ronald Azuma)提出的增强现实的定义认为增强现实技术应具有三个具体特征:三维注册、虚实融合以及实时交互<sup>[22]</sup>。目前米尔格拉姆和阿祖马提出的增强现实定义得到了世界范围内 AR 技术研究者们的普遍认可。

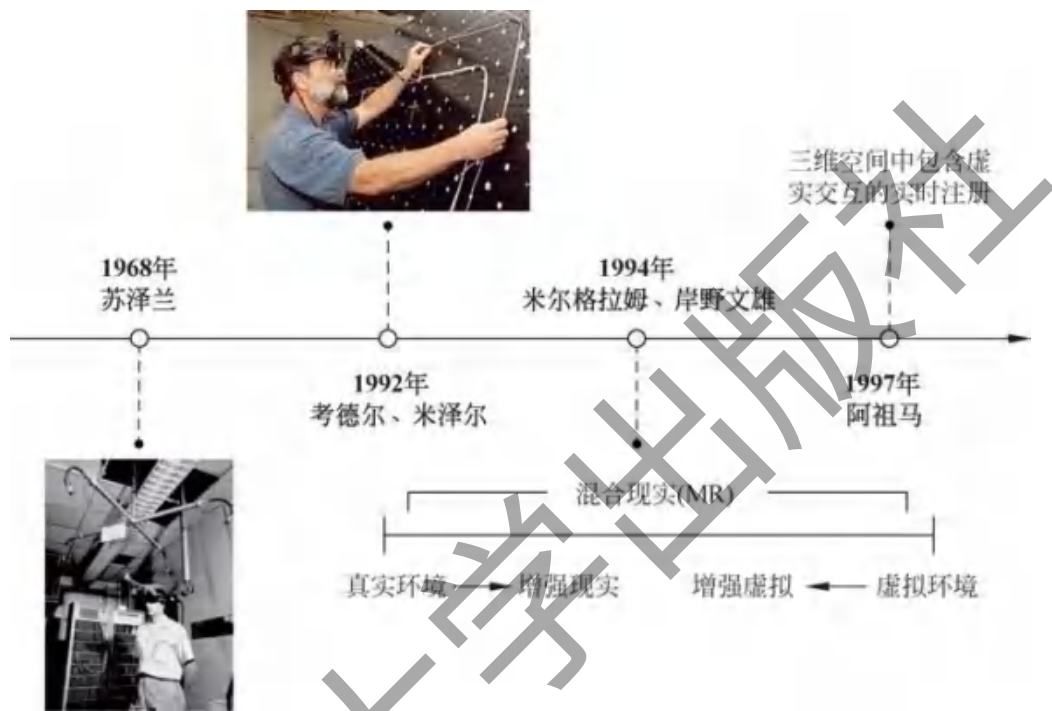


图 1-14 增强现实发展历史

### 1.1.3 VR 和 AR 的研究现状

虚拟现实技术仍然是目前的研究热点,国内外高校和公司都在关注虚拟现实技术的发展。总体来说,美国、德国、日本等国家在虚拟现实技术方面发展较早,而我国在虚拟现实技术方面起步较晚,但发展很快,在某些领域,大有后来居上之势。研究单位主要以北京航空航天大学、浙江大学、清华大学等院校为主。

#### 1. 美国的研究现状

虚拟现实技术发明于美国,同其他高新技术一样,美国首先将虚拟现实技术用于军事训练、航空航天培训(宇航员、飞行员和相关维修人员培训等)的各种模拟训练系统的研发。

20 世纪 80 年代,以美国国防部和美国宇航局为首推动了虚拟现实技术在军事和航天方面的快速发展,取得了显著成就。美国宇航局 Ames 实验室对虚拟现实技术的发展起到了重要的作用<sup>[23]</sup>。1984 年启动了虚拟视觉环境显示(virtual

visual environment display, VIVED) 项目, 1986 年开发了虚拟界面环境工作站 (virtual interactive environment workstation, VIEW)。此外, Ames 实验室还改造了 HMD 以及数据手套, 使得这些设备能够进入工程化应用阶段。该实验室已经逐步建成了航空航天 VR 训练和维修系统。目前 Ames 正在开发一款模拟地外行星的 VR 系统——虚拟行星探索 (virtual planetary exploration, VPE)<sup>[24]</sup>, 用户可以通过浏览器, 足不出户地访问不同的行星系统, 如图 1-15 所示。



图 1-15 虚拟现实星球探索<sup>[24]</sup>

进入 20 世纪 90 年代以后, 美国将虚拟现实技术转向民用技术的发展, 许多高校和研究机构开始了虚拟现实相关的研究, 并且催生了大量虚拟现实公司。北卡罗来纳大学计算机系<sup>[25]</sup>是虚拟现实研究领域比较著名的团队之一, 主要在航空模拟驾驶、建筑仿真优化和外科手术仿真治疗等方面进行了深入研究。罗马琳达大学的医学中心<sup>[26]</sup>将虚拟现实技术用于神经疾病方面的研究, 将数据手套作为手部颤动测量工具, 并将手部运动实时地显示在计算机上, 进而进行诊断分析。斯坦福研究院 (Stanford Research Institute, SRI)<sup>[27]</sup>主要从事虚拟现实硬件的研究, 包括定位设备、视觉显示器、光学设备、触觉和力反馈设备、三维输入输出设备等。SRI 还利用虚拟现实技术进行军用飞机和车辆的驾驶训练, 通过虚拟仿真降低事故率。乔治·梅森大学<sup>[28]</sup>研制了一套动态虚拟环境中的流体实时仿真系统。施乐公司<sup>[29]</sup>将虚拟现实和增强现实技术用于未来办公室项目, 设计了一套虚拟现实窗口辅助办公系统。

近年来, 以谷歌、脸书 (Facebook) 和苹果为首的科技公司在虚拟现实领域展开了激烈的市场竞争, 发布了多款虚拟现实设备, 将虚拟现实技术应用于手机、平板电脑等移动设备, 使得虚拟现实技术能够走入千家万户, 为用户带来前所未有的体验。

美国波音公司通过虚拟现实技术为波音 737 Max 10 探索更好的加工工艺, 在虚拟现实环境下, 能够为飞机的装配工艺提供更好的指导<sup>[30]</sup>。

## 2. 欧洲的研究现状

在欧洲,以德国、英国和瑞典为首的发达国家积极开展虚拟现实技术的理论研究和实际应用。

德国 FhG-IGD 图形研究所和德国计算机技术中心主要从事虚拟现实技术的研究,包括虚拟感知、虚拟环境下的控制、虚拟现实在空间技术方面的应用、虚拟训练等<sup>[31]</sup>。他们还开发了一套测试平台,用来评估虚拟现实技术对未来系统和操作界面的影响。此外,德国还将虚拟现实技术用于传统制造业的改造,可以降低产品的设计和制造成本,避免返工和研发风险,提高企业竞争力。此外,通过虚拟现实技术还可以进行员工培训,降低企业培训成本。

英国虚拟现实技术<sup>[32]</sup>在分布式并行处理、外部设备的设计和应用等方面处于领先地位。以内容生产、生活服务、技术引导为核心的虚拟现实和增强现实公司在教育、医疗、制造、金融等行业都有着很大的优势。

瑞典研发的 DIVE 分布式虚拟交互环境<sup>[33]</sup>,是一个基于 UNIX 的、在不同节点上的多个进程可以在同一时间进行工作的异质分布式虚拟系统。

欧洲空客公司也将虚拟显示技术应用于飞机维修过程当中,能够大大降低成本<sup>[34]</sup>。

## 3. 日本的研究现状

日本有众多高校和研究所从事虚拟现实技术的理论研究和实际应用,此外,索尼和任天堂等日本游戏公司在虚拟现实游戏开发方面形成了一定的市场规模。

东京大学<sup>[35]</sup>为虚拟现实技术提供了一种新的显示方式,为了解决目前虚拟现实显示与交互存在的局限性,他们开发了一种全新的虚拟全息系统,该系统与 CAVE 系统类似,用户可以在其中进行漫游和交互。

日电(NEC)公司开发了一种虚拟现实系统<sup>[36]</sup>,可以建立真实世界中的手与虚拟手之间的关系,能够让用户使用虚拟手操作虚拟模型。

日本奈良先端技术研究院开发了一种嗅觉模拟器<sup>[37]</sup>,借助于该模拟器,当用户在虚拟空间中靠近不同的水果时,可以通过控制外部装置向鼻尖处散发不同水果的气味,这是虚拟现实技术在除了视觉领域之外的重要研究突破。

索尼公司<sup>[38]</sup>2016 年发布了头戴式虚拟现实设备——PSVR(PlayStation VR),借助于自身游戏平台 PlayStation,索尼公司发布了大量优质的虚拟现实游戏,牢牢占据了虚拟现实游戏市场。任天堂公司早在 1995 年就发布了一款虚拟现实设备——Virtual Boy,但是由于当时设计理念过于前卫,技术不够成熟,导致产品夭折。2019 年,任天堂重新布局虚拟现实市场,于 3 月发布了 Switch 游戏机的配件 Labo VR kit,能够将 Switch 游戏机变身为虚拟现实眼镜。

## 4. 我国的研究现状

虚拟现实技术的研究在我国起步较晚,但是随着计算机技术以及互联网技术



在我国快速发展,越来越多的高校开展了虚拟现实技术研究,同时也涌现出了大量虚拟现实企业。国家非常重视对虚拟现实与增强现实这项新技术的研究和应用推广,从国家层面制定了虚拟现实研究计划,科技部、国家自然科学基金委、工信部等部门都把虚拟现实技术列入了其设立的各类科技计划。

北京航空航天大学是国内最早从事虚拟现实研究和应用的高校之一,从最开始的理论研究,到现在的成果转换,北京航空航天大学将虚拟现实应用到了国防军事、航空航天、医疗手术、装备制造等各个方面。2007年,北京航空航天大学虚拟现实技术与系统国家重点实验室被批准建设<sup>[39]</sup>,实验室总体定位于虚拟现实的应用基础与核心技术研究,这是我国在VR/AR领域第一个也是唯一一个国家级重点实验室。实验室在赵沁平院士的带领下开发了我国第一个基于广域专用计算机网络的虚拟现实环境——分布式虚拟环境(distributed virtual environment NETwork, DVENET),该系统支持异步分布式虚拟现实应用的开发,能够满足虚拟现实全周期、全过程的应用开发。此外,该实验室还研制了多款虚拟仿真器,包括直升机虚拟仿真器、坦克虚拟仿真器、虚拟战场环境观察器等,为我国的军事训练和航空航天训练提供多样化的虚拟仿真平台。实验室在原始创新的基础之上,发挥多学科交叉与军民融合优势,为虚拟现实技术在我国军用和民用的发展做出了引领性的贡献。

浙江大学计算机辅助设计与图形学国家重点实验室<sup>[40]</sup>在虚拟环境真实感知和虚实环境融合等方面开展了深入探索,该实验室还研究了多种虚拟现实关键技术,包括虚拟环境漫游技术、实时绘制技术、人机交互技术等,开发了虚拟现实平台,并应用在文化娱乐、国防安全、装备制造等领域。该实验室还研究了多种高效算法来提高虚拟绘制的实时性,包括虚拟环境中的快速漫游算法和递进网格的快速生成算法等,开发了虚拟建筑实时漫游系统,为用户提供交互手段用于提高用户在虚拟环境漫游过程中的真实感受。

清华大学虚拟现实与人机界面实验室<sup>[41]</sup>在虚拟现实人机交互和系统设计方面进行了深入的系统研究。同时也致力于研究和开发一些适用于大学和科研机构教学与研究使用的虚拟现实系统,提供整套解决方案,包括整套系统集成、重要人机交互设备以及仿真分析软件。研究成果包括:运用数据手套和位置跟踪器实现虚拟零件装配,通过虚拟现实进行手术仿真,开发了虚拟驾驶模拟系统和基于运动跟踪和多通道拼接大屏幕投影系统的虚拟操控场景仿真等。清华大学国家光盘工程研究中心通过QuickTime技术实现了足不出户地欣赏布达拉宫全景。

北京大学汪国平教授团队自主研发了超大规模分布式虚拟仿真支撑平台viwo<sup>[42]</sup>,用于飞行模拟的视景仿真系统等,取得了很好的效果。

北京理工大学长期致力于虚拟现实技术在国防系统的应用,为中国航天员科研训练中心成功研制了VR眼镜<sup>[43]</sup>,能够有效地缓解航天员在太空的心理压力,帮助我国航天员顺利完成长达1个月的在轨驻留任务。

北方工业大学增强现实与互动娱乐团队<sup>[44]</sup>在虚拟现实理论算法和应用开发方面开展了大量卓有成效的研究。他们通过硬件设备开发具有沉浸感的虚拟现实技术,成功研发了“北方工业大学虚拟校园”。此外,他们通过数字头盔、数据手套、立体投影、动感座椅等硬件设备制作了 3D 短片,通过 120°环幕立体投影系统播放,有较强的立体效果,并正研发具有动感的 4D 短片;他们还建设了新媒体实验室,自主研制了虚拟驾驶系统、动作捕捉系统、虚拟幻象系统、赤影系统等。

北京科技大学人工智能与三维可视化团队<sup>[45]</sup>在虚拟现实方面研究了基于物理的流体三维真实感模拟及可视化,提出可交互的非均质流体动画三维建模,面向多相流场景的交互现象模拟,基于数据驱动的流体模拟等方面的研究方法。北京科技大学还开发了一款实用的纯交互式汽车模拟驾驶培训系统。

此外,国内从事虚拟现实与增强现实研究的高校和机构还包括:国防科技大学、天津大学、中国科学院自动化研究所、北京邮电大学、深圳大学、山东大学等,这些单位都在虚拟现实与增强现实技术理论及其应用方面取得了突出成绩,为该技术在我国的推广普及做出了贡献。限于篇幅,在此不一一赘述。

#### 1.1.4 VR 与 AR 的联系与区别

虚拟现实与增强现实联系十分紧密,存在诸多相似之处。

(1) 均需绘制虚拟信息:虚拟现实中的场景全部由计算机绘制的虚拟信息构成,用户完全沉浸在虚构的数字环境中;增强现实中的场景大部分是真实环境,同时叠加少量虚拟信息。因此,两者都需要计算机生成相应的虚拟信息。

(2) 均需用户使用显示设备:虚拟现实和增强现实都需要使用显示设备将计算机生成的虚拟信息呈现给用户。

(3) 均需进行实时交互:虚拟现实和增强现实作为两种虚实交互手段,与用户的实时交互是必不可少的。

虽然二者有着不可分割的联系,但是虚拟现实与增强现实之间的区别也很明显。

(1) 对于沉浸感的要求不同:虚拟现实强调用户在虚拟环境中的完全沉浸,将用户感官与现实世界隔离,使其完全沉浸在虚拟数字环境中,通常采用沉浸式的显示方式,如头盔显示器、CAVE 系统等;但增强现实不仅不与现实环境隔离,反而强调用户在现实世界的存在,通常采用透视式头盔显示器。

(2) 对系统算力和资源的需求不同:虚拟现实系统由于需要实时渲染绘制全局场景,对系统算力和资源需求很高,需要大型专业投影设备;而在增强现实系统中,计算机不需要构建整个场景,只需要对叠加的虚拟物体进行渲染处理,因此计算量大大降低。

(3) 侧重的应用领域不同:虚拟现实系统强调用户在虚拟环境中的感官完全沉浸,重点应用于对高成本、高风险的真实环境进行预先模拟或过程仿真;增强现