



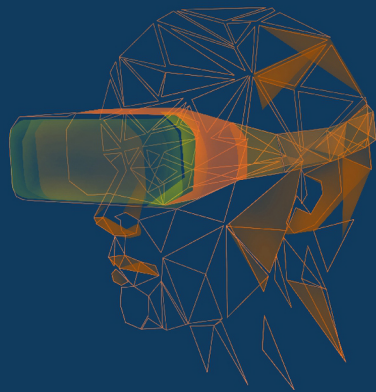
国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION



国家出版基金资助项目
“十三五”国家重点图书出版规划项目
湖北省学术著作出版专项资金资助项目
智能制造与机器人理论及技术研究丛书
总主编 丁汉 孙容磊

基于VR/AR的智能制造技术

鲍劲松 武殿梁 杨旭波◎编著



JIYU VR/AR DE ZHINENG ZHIZAO JISHU



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

国家出版基金资助项目
智能制造与机器人理论及技术研究丛书

基于 VR/AR 的智能制造技术

鲍劲松 武殿梁 杨旭波 编著

华中科技大学出版社

华中科技大学出版社
中国·武汉

内 容 简 介

虚拟现实(VR)和增强现实(AR)作为新一代的可视化和人机交互手段,是智能制造技术重要的组成部分,位于智能制造体系的表示层。本书作为该领域的专业书籍,在内容上涵盖智能制造与VR/AR的概念、反映智能制造核心技术的前沿制造技术、贯穿制造过程生命周期的VR/AR应用技术等。

本书分10章,可以分为三大部分:第一部分(第1~2章)介绍VR/AR的概念,智能制造的概念、关键技术、新的发展热点。第二部分(第3~7章)介绍基于VR/AR的智能制造技术,包括制造系统建模、全生命周期数据集成、人机交互技术、数字孪生技术、工业大数据等,以及这些技术与VR/AR的融合、互操作的研究。第三部分(第8~10章)主要通过设计、制造等方面的典型案例来介绍基于VR/AR的实现方式,介绍主流的工具集,并给出了案例实现,以便有兴趣的科研人员对照实现;给出了在AI技术、5G技术等新技术的快速发展态势下,基于VR/AR的智能制造技术的发展趋势。

本书可作为高等院校机械制造、自动化及相关专业的本科生或研究生教材,也可以供对智能制造感兴趣的研究人员和工程技术人员阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

基于VR/AR的智能制造技术/鲍劲松,武殿梁,杨旭波编著. —武汉:华中科技大学出版社,2020.8

(智能制造与机器人理论及技术研究丛书)

ISBN 978-7-5680-6197-1

I. ①基… II. ①鲍… ②武… ③杨… III. ①智能技术—研究 IV. ①TP18

中国版本图书馆CIP数据核字(2020)第155108号

基于VR/AR的智能制造技术

鲍劲松 武殿梁 杨旭波 编著

Jiyu VR/AR de Zhineng Zhizao Jishu

策划编辑:万亚军

责任编辑:姚同梅

封面设计:原色设计

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

电话:(027)81321913

武汉市东湖新技术开发区华工科技园

邮编:430223

录 排:武汉三月禾文化传播有限公司

印 刷:湖北新华印务有限公司

开 本:710mm×1000mm

印 张:33.75

字 数:548千字

版 次:2020年8月第1版第1次印刷

定 价:198.00元



本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究



总序

近年来,“智能制造+共融机器人”特别引人注目,呈现出“万物感知、万物互联、万物智能”的时代特征。智能制造与共融机器人产业将成为优先发展的战略性新兴产业,也是中国制造 2049 创新驱动发展的巨大引擎。值得注意的是,智能汽车与无人机、水下机器人等一起所形成的规模宏大的共融机器人产业,将是今后 30 年各国争夺的战略高地,并将对世界经济发展、社会进步、战争形态产生重大影响。与之相关的制造科学和机器人学属于综合性学科,是联系和涵盖物质科学、信息科学、生命科学的大科学。与其他工程科学、技术科学一样,制造科学、机器人学也是将认识世界和改造世界融合为一体的大科学。20 世纪中叶,*Cybernetics* 与 *Engineering Cybernetics* 等专著的发表开创了工程科学的新纪元。21 世纪以来,制造科学、机器人学和人工智能等领域异常活跃,影响深远,是“智能制造+共融机器人”原始创新的源泉。

华中科技大学出版社紧跟时代潮流,瞄准智能制造和机器人的科技前沿,组织策划了本套“智能制造与机器人理论及技术研究丛书”。丛书涉及的内容十分广泛。热烈欢迎各位专家从不同的视野、不同的角度、不同的领域著书立说。选题要点包括但不限于:智能制造的各个环节,如研究、开发、设计、加工、成形和装配等;智能制造的各个学科领域,如智能控制、智能感知、智能装备、智能系统、智能物流和智能自动化等;各类机器人,如工业机器人、服务机器人、极端机器人、海陆空机器人、仿生/类生/拟人机器人、软体机器人和微纳机器人等的发展和应用;与机器人学有关的机构学与力学、机动性与操作性、运动规划与运动控制、智能驾驶与智能网联、人机交互与人机共融等;人工智能、认知科学、大数据、云制造、物联网和互联网等。

本套丛书将成为有关领域专家、学者学术交流与合作的平台,青年科学家茁壮成长的园地,科学家展示研究成果的国际舞台。华中科技大学出版社将与



施普林格(Springer)出版集团等国际学术出版机构一起,针对本套丛书进行全球联合出版发行,同时该社也与有关国际学术会议、国际学术期刊建立了密切联系,为提升本套丛书的学术水平和实用价值,扩大丛书的国际影响营造了良好的学术生态环境。

近年来,高校师生、各领域专家和科技工作者等各界人士对智能制造和机器人的热情与日俱增。这套丛书将成为有关领域专家学者、高校师生与工程技术人员之间的纽带,增强作者与读者之间的联系,加快发现知识、传授知识、增长知识和更新知识的进程,为经济建设、社会进步、科技发展做出贡献。

最后,衷心感谢为本套丛书做出贡献的作者和读者,感谢他们为创新驱动发展增添正能量、聚集正能量、发挥正能量。感谢华中科技大学出版社相关人员在组织、策划过程中的辛勤劳动。

华中科技大学教授

中国科学院院士

熊有伦

2017年9月



前言

当前,计算机、人工智能、新一代通信与传感器等方面技术迅猛发展,加快了制造业数字化、智能化、网络化水平提升的速度,从根本上加强了工业知识产生和利用的效果。作为新一代的人机交互界面技术,虚拟现实(VR)和增强现实(AR)技术已成为先进的制造技术工具,像机器人技术、3D 打印技术和物联网 VR/AR 技术一样,正以创新的方式被使用,并已成为智能制造重要的使能技术。

智能制造是跨学科的、系统级的技术。本书提及的制造,既包括狭义制造(指产品的机械工艺/加工过程,也称为“小制造”),又包括广义制造(涵盖包括市场需求、产品设计、计划控制、生产工艺过程、装配检验、销售服务等环节的产品整个生命周期的全过程,也称为“大制造”)。智能制造源于机械、自动化和信息等学科的交叉与融合,而 VR/AR 发端并植根于计算机科学领域,涉及多通道感知、计算机图形学等领域知识。本书从 VR/AR 的可视化和人机交互特点展开,重点探讨智能制造的集成体系、建模方法、信息融合技术和实际应用。

本书共分 10 章,以智能制造为核心,以数字主线下的制造上下文信息的流动研究为脉络,主要介绍了 VR/AR 的可视化技术、人机交互界面技术,同时介绍了主流的工具集,并给出了其案例实现,以便有兴趣的科研人员参考。

本书在内容上尽可能涵盖当前 VR/AR 的主要应用技术。但作为新兴的技术,智能制造和 VR/AR 正处在快速发展阶段,基于 VR/AR 的智能制造关键技术、实现手段、表达方式等日新月异。很多重要、前沿的实现方式本书都没有涉及,尤其是新一代的图形学技术本身,本书仍然采用了较为经典的实现方式。



本书采用了一些主流研究机构的原型/源码,供读者参考。

随着智能制造技术的快速发展,VR/AR 技术的发展也呈现出突飞猛进的气势。这是多种跨学科技术交叉与融合的结果,而目前尚缺乏相应书籍来介绍这些跨学科技术的融合。作者才疏学浅,对各个领域的理解也比较肤浅,对理论研究的深入程度还远远不够,书中难免有错误和不妥之处,恳请读者批评指正。

鲍劲松 武殿梁 杨旭波

2019 年 3 月于沪上

华中科技大学出版社



目录

第 1 章 虚拟现实/增强现实技术基础	/ 1
1.1 VR/AR 的概念与发展历程	/ 1
1.1.1 VR/AR 的特点	/ 4
1.1.2 VR/AR 的内涵与发展	/ 5
1.2 VR/AR 的基本原理	/ 7
1.2.1 VR/AR 的计算机图形学基础	/ 7
1.2.2 沉浸显示基本原理	/ 14
1.2.3 自然交互基本原理	/ 17
1.2.4 虚实场景融合基本原理	/ 19
1.3 基于 VR/AR 的典型制造业应用场景	/ 21
1.3.1 虚拟装配	/ 21
1.3.2 工厂虚拟布局与规划	/ 21
1.3.3 自动化单元仿真	/ 22
1.3.4 生产作业虚拟培训	/ 23
第 2 章 智能制造体系与关键技术	/ 25
2.1 智能制造体系	/ 25
2.1.1 定义与参考模型	/ 25
2.1.2 以 CPS 为核心的智能制造关键技术	/ 35



2.2	VR/AR 技术驱动的智能制造系统	/49
2.2.1	系统框架	/50
2.2.2	关键技术	/56
2.3	VR/AR 技术的制造业应用挑战	/64
第 3 章	基于 VR/AR 的制造系统建模与仿真技术	/67
3.1	面向 VR/AR 的大规模三维建模关键技术	/67
3.1.1	大规模场景建模技术	/67
3.1.2	大规模场景的实时处理	/88
3.1.3	大规模场景中的交互操作	/95
3.1.4	大规模真实感场景渲染技术	/101
3.2	虚拟工厂三维建模方法	/110
3.2.1	制造场景建模	/111
3.2.2	虚拟工厂的三维布局建模	/113
3.2.3	虚拟工厂建模实例	/125
3.3	VR 环境中的生产系统布局仿真	/131
3.3.1	三维虚拟工厂模型的静态空间评价	/131
3.3.2	生产过程的运动仿真与评价	/137
3.3.3	某飞机虚拟工厂布局优化实例	/156
第 4 章	智能制造系统虚实信息集成与可视化	/161
4.1	基于数字主线的制造系统虚实信息集成	/161
4.1.1	数字主线相关概念	/161
4.1.2	基于数字主线的信息集成框架	/167
4.1.3	数字主线的数据采集技术	/171
4.1.4	基于 VR/AR 的数字主线体系	/181
4.2	基于 MBD 的产品模型集成及可视化	/184
4.2.1	基于 MBD 的产品模型集成	/184
4.2.2	制造上下文中的产品多尺度信息集成	/198

4.2.3	VR/AR 环境下的 MBD 可视化	/203
4.3	面向产品多学科分析的科学计算可视化	/210
4.3.1	工程数据可视化表达	/210
4.3.2	融合多学科数据的可视化	/213
4.4	制造过程信息集成与可视化	/218
4.4.1	基于知识图谱的制造上下文数据集成	/218
4.4.2	制造信息知识图谱信息存储模式	/225
第 5 章	智能制造中的 VR/AR 人机交互技术	/231
5.1	VR/AR 中的人机交互技术	/231
5.1.1	人机交互的概念	/231
5.1.2	VR/AR 中常用的人机交互技术	/233
5.2	手绘草图交互识别技术	/240
5.2.1	基于人工智能的三维草图识别	/240
5.2.2	基于手绘的三维物体交互设计与分析	/242
5.3	虚拟装配/维护中的人机交互	/245
5.3.1	装配交互方式	/245
5.3.2	实时智能化引导技术	/247
5.3.3	装配/维护系统的交互式作业流程	/251
5.4	AR 系统的编辑交互技术	/254
5.4.1	编辑工具交互设计	/254
5.4.2	静态场景编辑方法	/256
第 6 章	基于 VR/AR 的数字孪生技术	/260
6.1	数字孪生与 VR/AR	/260
6.1.1	数字孪生概述	/260
6.1.2	智能制造系统的数字孪生模型	/272
6.1.3	基于 VR/AR 的数字孪生系统与关键技术	/276
6.2	基于 VR/AR 的产品数字孪生	/297



6.2.1	产品数字孪生驱动下的外观评估	/297
6.2.2	产品数字孪生驱动下的装配作业指导与评估	/299
6.2.3	产品数字孪生驱动下的制造偏差评估	/301
6.2.4	典型应用案例	/306
6.3	基于 VR/AR 的制造数字孪生技术	/309
6.3.1	制造数字孪生驱动下的加工过程监控	/310
6.3.2	制造数字孪生驱动下的制造物流调度	/313
6.3.3	制造数字孪生驱动下的制造计划执行监控	/318
6.4	VR/AR 环境下的产品在役运行数字孪生	/322
6.4.1	性能数字孪生驱动下的设备健康状况维护	/322
6.4.2	性能数字孪生驱动下的制造系统性能分析	/327
6.4.3	结语	/344
第 7 章	基于 VR/AR 的制造大数据可视化	/345
7.1	制造大数据概述	/345
7.1.1	制造大数据特征	/345
7.1.2	制造大数据来源及类型	/348
7.1.3	制造大数据体系与关键技术	/351
7.2	基于 VR/AR 的制造大数据可视化技术	/360
7.2.1	大数据可视化技术	/361
7.2.2	基于 VR/AR 的大数据可视化表达	/364
7.2.3	基于 VR/AR 的制造大数据挖掘与交互	/386
7.3	制造大数据可视化工具	/391
7.3.1	WebXR 技术	/391
7.3.2	基于 WebVR 的可视化开发工具	/392
第 8 章	基于 VR/AR 的典型智能制造应用案例	/395
8.1	航空发动机智能辅助装配	/395
8.1.1	案例介绍	/395

8.1.2	软硬件系统	/398
8.1.3	基于 AR 的辅助装配	/403
8.2	基于 AR 的线缆装配	/409
8.2.1	基于 AR 的线缆装配平台	/410
8.2.2	线缆虚拟装配流程	/412
8.3	复杂装备诱导维修	/416
8.3.1	案例介绍	/416
8.3.2	软硬件系统	/418
8.3.3	基于 AR 的诱导性维修	/421
8.4	基于 VR 的航天薄壁件制造过程仿真	/424
8.4.1	案例介绍	/424
8.4.2	软硬件系统	/425
8.4.3	多尺度信息 VR 可视化系统	/427
8.5	火箭箭体制造车间实时管控	/430
8.5.1	案例介绍	/430
8.5.2	软硬件系统	/431
8.5.3	火箭箭体制造车间运行实时监控	/438
第 9 章	VR/AR 支撑工具集	/446
9.1	VR/AR 系统	/446
9.1.1	VR 系统	/446
9.1.2	AR 系统	/449
9.1.3	大型沉浸式 VR 系统搭建	/453
9.2	典型商业开发工具	/467
9.2.1	Unity3D	/467
9.2.2	达索 3DExcite Deltagen	/473
9.3	典型开发工具包	/474
9.3.1	OpenSceneGraph	/474



9.3.2	PTC Vuforia	/477
9.3.3	Apple ARKit	/483
9.3.4	Google ARCore	/488
9.4	自主智能制造软件平台	/493
9.4.1	系统框架	/493
9.4.2	主要功能介绍	/495
第 10 章	VR/AR 技术发展趋势与展望	/501
10.1	5G 与 VR/AR 融合	/501
10.1.1	制造过程海量数据的低时延传输	/503
10.1.2	制造物联网的高密度互联互通	/504
10.1.3	制造过程的“第一视角”人在回路协同	/505
10.1.4	面向制造的云 VR/AR 平台	/506
10.2	AI 与 VR/AR 深度融合	/508
10.2.1	AI 辅助下的 VR/AR	/509
10.2.2	VR/AR 构建智能助手	/513
10.3	VR/AR 的工业应用标准	/515
10.3.1	基于 AR 的维修维护标准	/515
10.3.2	AR/VR 的物联网应用标准	/516
	参考文献	/517



第 1 章

虚拟现实/增强现实技术基础

沉浸式体验技术在娱乐领域应用广泛。沉浸式体验既包括人的感官体验,又包括人的认知体验,主要的实现技术是虚拟现实(VR)与增强现实(AR)等技术。VR/AR 技术面世已逾 50 年,但直到最近 5 年才有突飞猛进的发展。VR/AR 技术对制造业而言也是新的推动力。本章将介绍 VR/AR 技术的发展历程、基本原理和技术基础,并介绍目前该技术在制造业中的典型应用。

1.1 VR/AR 的概念与发展历程

图 1-1 所示为世界著名咨询战略公司 Gartner 2018 年发布的前沿和颠覆性的科技发展成熟度曲线(hype cycle)^[1],该曲线描述了各种前沿技术目前所处的阶段。在这些前沿技术中,与用户体验相关的技术主要是沉浸式体验技术,包括 VR、AR 和混合现实(mixed reality,MR)技术等。

最近 5 年沉浸式体验技术发展速度非常快,由 2018 年的 Gartner 科技发展成熟度曲线可以看出:AR 技术已经过了期望膨胀期的巅峰,正在艰难通过第三阶段——泡沫破裂低谷期;MR 技术正在第三阶段的下降坡上。同时,作为人机界面接口技术(VR/AR/MR 技术)的应用和使能技术,虚拟助理(virtual assistants)技术、数字孪生(digital twin)技术、立体显示(volumetric displays)技术等正处在期望膨胀期或技术萌芽期。而 VR 技术已经进入稳定发展阶段。将来沉浸式技术会发展到哪种程度还很难确定,可以确定的是:人机交互界面技术研究一定会长期处在技术前沿。

作为数字化世界的先进人机接口技术,VR、AR 和 MR 到底是什么? Milgram 等人^[2]给出了图 1-2 所示的简图,表达了虚拟环境与现实环境的界限。

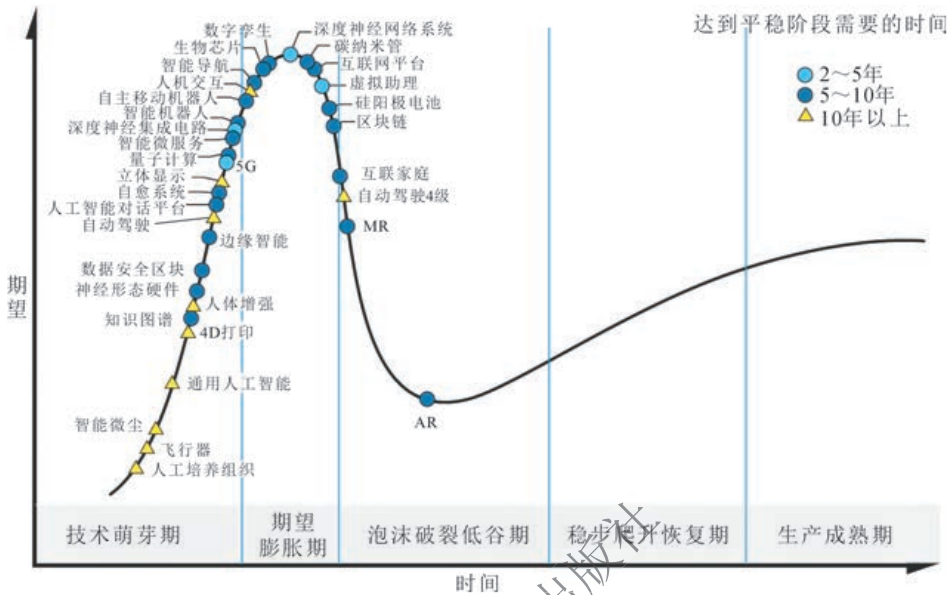


图 1-1 Gartner 公司 2018 年发布的科技发展成熟度曲线

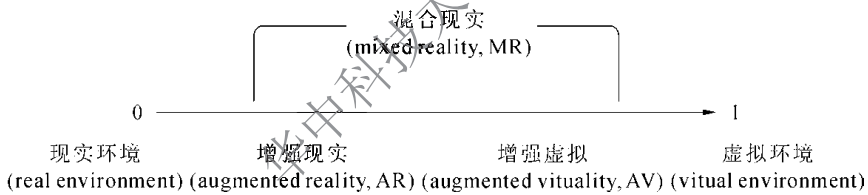


图 1-2 虚拟环境与现实环境的界限^①

用一条数轴来表示,1 代表虚拟环境,0 代表现实环境,越靠近 1,虚拟成分越多,真实成分越少,反之相反。VR、AR、MR 距离虚拟环境和现实环境的远近不同。

(1) VR:可以让用户沉浸其中的由计算机生成的三维虚拟环境,与现实环境相隔绝。

(2) AR:在真实环境中增添或者移除由计算机实时生成的可以交互的虚拟物体或信息而构成的环境。

(3) MR:通过全息图,将现实环境与虚拟环境相互混合而构成的环境,也

^① 笔者从人机交互界面技术的角度,在本书中将 AR、MR 统一称为 AR,弱化了两种技术的细微不同,而突出了其通用的增强技术。

可以看成 VR 与 AR 的混合。

需要注意的是,增强技术根据其接近虚拟环境和现实环境的程度,可以分为增强虚拟(augmented virtuality, AV)和增强现实。增强虚拟一般较少提及。

从图 1-3 可以看出,由 VR 技术体验到的一切都是虚拟的,都是数字化技术营造的假象。VR 系统是一种可以创建和体验虚拟世界的计算机仿真技术,VR 环境是利用计算机生成的一种模拟环境,是一种通过多源信息融合而生成的交互式三维动态视景和实体行为的仿真环境,能使用户沉浸其中。AR/MR 都是将虚拟信息加入实际生活场景而形成的,也就是将现实扩大了,如汽车平视显示(HUD)系统将车速、导航信息等投影(或反射)在挡风玻璃上,就是典型的 AR 应用。

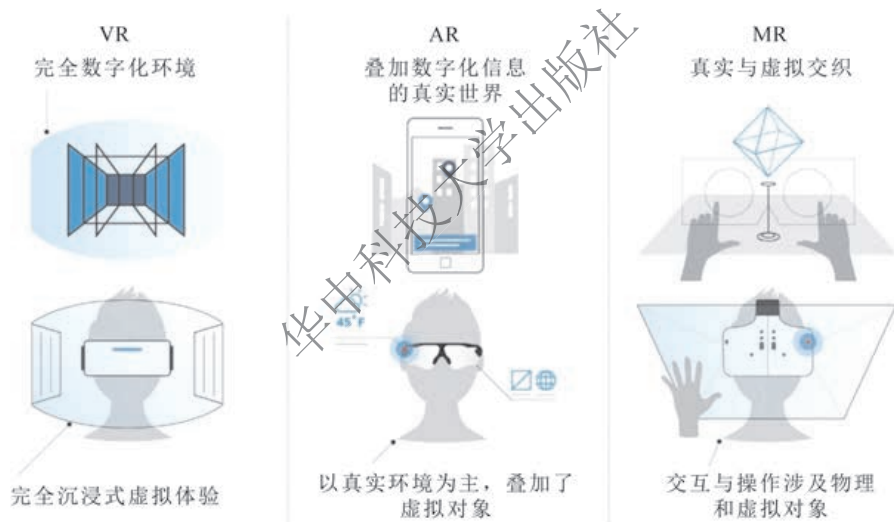


图 1-3 VR/AR/MR 概念图

AR、MR 都是将虚拟世界与真实世界混合在一起而产生的全新可视化环境,用户眼睛所见到的环境同时包含了现实的物理实体与虚拟信息,且可以实时呈现。MR 与 AR 十分接近,但两者有着些许不同,如图 1-4 所示:Google Glass 属于 AR 产品,它通过投影的方式在使用者眼前呈现天气面板,当使用者头部转动时,这个天气面板就会随之移动,且其与眼睛之间的相对位置不变。HoloLens 是 MR 产品,当 HoloLens 在空间的墙上投影出天气面板时,无论使用者头部如何转动,天气面板都处在墙上的固定位置。



图 1-4 Google Glass 与 HoloLens 比较

1.1.1 VR/AR 的特点

1. VR 的特点

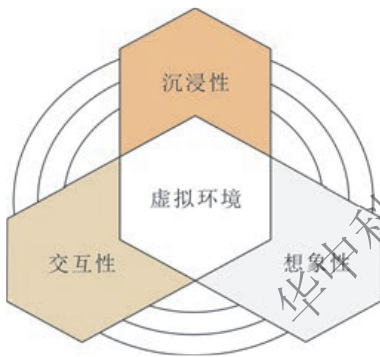


图 1-5 虚拟现实三大特性(3I)

VR 系统强调沉浸感、逼真性,既要求有较强的真实感、自然的交互方式,又要满足实时性的交互要求。VR 主要有如下三个特性(即“3I”特性,见图 1-5)。

(1) 沉浸(immersion)性:沉浸性是指 VR 技术可使操作者感觉到自己完全置身于虚拟环境中,被虚拟世界所包围,是虚拟世界中的一部分,从而使操作者由被动的观察者变成主动的参与者,沉浸于虚拟世界之中,参与虚拟世界的各种活动。“沉浸”包括身体沉浸和精神沉浸两方面的含义。由 VR 获得的沉浸感来源于对虚拟世界的多重感知,包括视觉、听觉、触觉感知,以及运动感知、味觉感知、力觉感知、嗅觉感知、身体感知等。

(2) 交互(interaction)性:交互性是指 VR 系统的操作者能与虚拟世界中的各种对象交互。在传统的多媒体技术中,人机之间主要通过键盘与鼠标进行一维、二维的交互,而 VR 系统中人与虚拟世界之间以自然的方式进行交互,人借助特殊的 VR 硬件设备,以自然的方式,与虚拟世界进行交互,实时产生与在现实世界中一样的感受。如用户可以用手直接抓取虚拟世界中的物体,并可以感知物体的重量、软硬等。

(3) 想象(imagination)性:想象是虚拟世界的起点,VR 为人类更深入地认