



# 虚拟现实技术 及在航空航天中的应用

姜国华 主编



国防工业出版社

National Defense Industry Press

总装部队军事训练“十五”统编教材

科研试验系列

# 虚拟现实技术 及在航空航天中的应用

姜国华 主编

国防工业出版社

·北京·

### 图书在版编目 (CIP) 数据

虚拟现实技术及在航空航天中的应用/姜国华主编.  
北京:国防工业出版社,2007.10  
总装部队军事训练“十五”统编教材.科研试验系列  
ISBN 978-7-118-05313-5

I. 虚... II. 姜... III. ①虚拟技术-应用-航空工程-  
教材②虚拟技术-应用-航天工程-教材 IV. V-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 118989 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100044)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 880 × 1230 1/32 印张 8 $\frac{5}{8}$  字数 243 千字

2007 年 10 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 25.00 元

---

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

## 第三届总装备部军事训练教材 编辑工作委员会

- 主任委员 张建启
- 副主任委员 曹保榆 夏长法 侯贺华 郭文敏
- 委 员 (按姓氏笔画排序)
- 于俊民 王宜标 王泽民 尤广志
- 冯 章 朱双华 朱忠刚 刘树军
- 刘瑞成 安敏建 李方洲 李治三
- 肖力田 迟宝山 张忠华 张海东
- 陈永光 胡利民 侯 鹰 姜世忠
- 聂 皞 倪红星 徐 航 郭 勇
- 黄伟强 彭华良 裴承新 潘贤伦
- 秘 书 长 聂 皞
- 办公室主任 田 禾
- 办公室副主任 石根柱 郝 刚
- 办公室成员 李国华 李立法 郑晓娜

# 第三届总装备部军事训练教材 航天医学系统编委会

主任委员 陈善广

副主任委员 姜世忠

委 员 (按姓氏笔画排序)

马建林 王宪民 白延强 刘国宁 李莹辉

姜国华

秘 书 李 娜 石根柱

## 本书编写组

主 编 姜国华

副 主 编 王宝智

主 审 陈善广

编 著 者 姜国华 周前祥 王春慧

王宝智 田志强 张 炎

# 序

军事训练教材是部队开展军事训练和培养高素质科研试验与管理人才的重要基础。“十五”期间是我军加速武器装备现代化建设的关键时期,随着科学技术不断发展,新武器、新装备大量投入部队使用,急需编写相应的配套教材,来满足部队军事训练和人才培养的需求。为此,总装司令部印发了《总装部队军事训练教材建设“十五”计划》,并组织部分专家、学者编著了这套总装部队军事训练“十五”统编教材。

编著这套总装部队军事训练“十五”统编教材是国防科研试验事业继往开来的大事,也是体现国防科研试验技术水平的一个重要标志。它以新时期军事战略方针为统揽,以军委和总装首长关于加强军事训练工作的一系列重要指示为指导,以《军事训练与考核大纲》、《继续教育科目指南》为依据,坚持科学性、前瞻性和实用性相结合,不断满足军事训练和人才培养对教材的需求,为圆满完成武器装备科研试验和管理保障任务提供了有力的技术支持。

“十五”统编教材共计 69 部,内容涉及科研试验、陆军装备科研订购、通用装备保障和试验后勤等 4 个系列的 28 个系统。这套教材既总结升华了武器装备科研试验和管理保障经验,又反映了国内外最新动态和发展方向,是对国防科研试验工程技术系列教材建设的进一步延续和扩展,是一批高质量的精品教材。其使用对象主要是部队具有大专以上学历的科技人员和管理干部,也可供院校有关专业师生使用或参考。

期望这套教材能够有益于部队高素质人才的培养,有益于武器装备科研试验和管理保障任务的完成,有益于国防科技事业的进步。

总装备部军事训练教材

编辑工作委员会

二〇〇五年十二月

# 前 言

虚拟现实是一种新型的人—机界面形式,是计算机图形学、网络技术、图像处理与模式识别、传感器测量等多项技术发展的综合产物。本书立足于虚拟现实具体应用,系统地阐述了虚拟现实技术的主要内容,包括系统构成、体验者“人的因素”分析、视景生成理论和常用的计算模型、虚拟环境中的人—机交互与检测原理、虚拟环境中图像识别与语音合成以及目前国内外相关软硬件开发环境和平台等。同时,结合了 NASA 哈勃太空望远镜虚拟训练和虚拟风洞研究、BOEING 的飞机虚拟装配以及作者所进行的虚拟航天器设计和相关认知工效学研究,介绍了该项技术在航空航天领域中的具体应用,以加深读者对虚拟现实技术的理解。

本书由姜国华研究员负责框架的构思,全书由王宝智统稿,姜国华和王宝智共同审稿。各章撰稿人员如下:

姜国华(中国航天员科研与训练中心飞行模拟器研究室)撰写第 1 章和第 2 章;周前祥(中国航天员科研与训练中心航天工效学研究室)、王宝智(中国航天员科研与训练中心飞行模拟器研究室)共同撰写第 5 章和第 9 章;

王春慧(中国航天员科研与训练中心飞行模拟器研究室)撰写第 4 章和第 6 章;

田志强(中国航天员科研与训练中心飞行模拟器研究室)撰写第 8 章和第 9 章;

张炎(中国航天员科研与训练中心飞行模拟器研究室)撰写第 3 章和第 7 章。

特别感谢中国航天员科研与训练中心主任、载人航天工程航天员系统总设计师陈善广研究员在百忙中认真审阅了本书,并给予的细心指导。

本书可作为计算机应用科学、航天工效学、工程学、心理学等多门学



科教材,也可作为对虚拟现实技术感兴趣的工程总体技术人员和专业老师的参考读物。

虚拟现实技术属交叉科学研究,涉及的知识领域众多,由于本书作者水平有限,书中不当之处,恳请广大读者批评指正。

编者

# 目 录

<b>第1章 绪论</b> .....	1
1.1 虚拟现实(VR)概念 .....	1
1.1.1 VR 定义 .....	1
1.1.2 VR 历史起源 .....	1
1.1.3 VR 技术优点 .....	2
1.2 VR 系统特征与基本组成 .....	3
1.2.1 VR 系统特征 .....	3
1.2.2 VR 系统基本组成 .....	5
1.3 VR 系统分类 .....	8
1.3.1 桌面式 VR 系统.....	8
1.3.2 头盔显示或沉浸式 VR 系统 .....	9
1.3.3 增强叠加显示 VR 系统.....	10
1.3.4 分布式 VR 系统 .....	10
1.4 VR 技术应用领域 .....	12
思考题.....	13
参考文献 .....	14
<b>第2章 人的能力及特征</b> .....	15
2.1 信息接受.....	16
2.1.1 感觉和知觉的特征 .....	16
2.1.2 视觉机能及其特征 .....	23
2.1.3 听觉 .....	35
2.1.4 其他感觉机能与特征.....	41
2.2 人的信息处理系统 .....	45

2.2.1	信息存储 .....	45
2.2.2	分析、综合 .....	46
2.2.3	决策 .....	47
2.2.4	信息处理能力 .....	47
2.3	执行器 .....	48
2.3.1	肌肉和骨骼 .....	48
2.3.2	人的运动输出 .....	54
	思考题 .....	61
	参考文献 .....	62
<b>第3章</b>	<b>视景生成理论 .....</b>	<b>63</b>
3.1	概述 .....	63
3.1.1	视景生成系统组成 .....	63
3.1.2	视景生成工作过程 .....	63
3.2	视景的内部表示 .....	65
3.2.1	图形学表示 .....	65
3.2.2	图像表示 .....	66
3.2.3	视景的高层内部表示 .....	67
3.3	生成真实感三维图形的基本理论 .....	68
3.3.1	曲线曲面的数学基础 .....	69
3.3.2	光线跟踪技术 .....	78
3.3.3	辐射度方法 .....	81
	思考题 .....	81
	参考文献 .....	82
<b>第4章</b>	<b>虚拟现实系统的常用算法 .....</b>	<b>83</b>
4.1	概述 .....	83
4.2	真实感图形的绘制 .....	83
4.2.1	消隐算法 .....	84
4.2.2	光照模型 .....	87
4.2.3	纹理映射 .....	92

---

---

4.3 层次细节简化技术 .....	101
4.3.1 LOD 技术 .....	101
4.3.2 网格简化算法 .....	103
4.3.3 基于顶点聚类的模型简化算法 .....	104
4.3.4 基于删除操作的模型简化算法 .....	106
4.3.5 基于渐进网格的模型简化算法 .....	107
4.4 碰撞检测 .....	108
4.4.1 概述 .....	108
4.4.2 包围盒法 .....	111
思考题 .....	115
参考文献 .....	116
<b>第 5 章 虚拟现实人一机交互设备 .....</b>	<b>118</b>
5.1 立体显示原理 .....	118
5.1.1 人眼的结构与立体视觉机制 .....	118
5.1.2 立体显示原理 .....	120
5.2 立体显示设备 .....	129
5.2.1 HMD .....	130
5.2.2 BOOM .....	134
5.2.3 立体眼镜 .....	135
5.2.4 立体投影显示 .....	137
5.2.5 3D 显示器 .....	139
5.2.6 墙式立体显示器 .....	139
5.3 虚拟环境中的位置跟踪设备 .....	141
5.3.1 位置跟踪的方式 .....	142
5.3.2 位置跟踪器的性能指标 .....	143
5.3.3 位置跟踪技术的类型 .....	146
5.3.4 虚拟现实系统中不良跟踪的后果 .....	152
5.4 触觉与力觉反馈装置 .....	153
5.4.1 触觉与力觉反馈的原理 .....	153

---

---

5.4.2 触觉与力觉反馈装置的种类 .....	155
5.5 VR 的 3D 声音系统 .....	159
5.6 VR 硬件的系统集成 .....	161
思考题 .....	164
参考文献 .....	164
<b>第 6 章 手势的合成与识别 .....</b>	<b>166</b>
6.1 概述 .....	166
6.2 人手结构特点及运动特性 .....	168
6.2.1 关节的运动分析 .....	170
6.2.2 关节的约束 .....	170
6.3 手势合成 .....	172
6.4 手势识别 .....	173
6.4.1 手势识别原理 .....	173
6.4.2 手势建模与手势输入 .....	175
6.4.3 手势识别方法 .....	178
思考题 .....	185
参考文献 .....	185
<b>第 7 章 开发环境和开发平台 .....</b>	<b>187</b>
7.1 图形 API:OpenGL 和 Direct3D .....	187
7.1.1 OpenGL .....	187
7.1.2 Direct3D .....	188
7.2 三维视景生成软件 .....	189
7.2.1 IRIS Performer .....	189
7.2.2 Vega .....	193
7.2.3 Vega Prime .....	196
7.2.4 VTree .....	197
7.2.5 Virtools .....	199
7.3 硬件计算平台 .....	201
7.3.1 Silicon Graphics - Onyx4 .....	201

7.3.2	SGI Onyx300 .....	202
7.3.3	simFUSION 6000 .....	203
7.4	小结 .....	204
	思考题 .....	205
	参考文献 .....	205
<b>第8章</b>	<b>飞行器的虚拟制造 .....</b>	<b>206</b>
8.1	概述 .....	206
8.1.1	虚拟制造的概念 .....	206
8.1.2	虚拟制造的分类 .....	207
8.1.3	虚拟制造的主要特点 .....	209
8.2	虚拟制造的关键技术 .....	210
8.2.1	建模技术 .....	210
8.2.2	仿真技术 .....	211
8.2.3	虚拟现实技术 .....	211
8.3	虚拟制造的应用领域 .....	212
8.4	虚拟制造技术在航空领域应用的成功案例 .....	215
8.4.1	三维数字化飞机设计制造技术 .....	215
8.4.2	波音飞机的虚拟制造 .....	217
8.4.3	我国首架数字化电子样机 .....	217
	思考题 .....	218
	参考文献 .....	219
<b>第9章</b>	<b>虚拟现实技术在航天工程中的典型应用 .....</b>	<b>221</b>
9.1	哈勃太空望远镜维护的虚拟训练 .....	221
9.1.1	哈勃太空望远镜的概况 .....	221
9.1.2	虚拟训练技术 .....	223
9.1.3	训练及评价方法 .....	225
9.2	虚拟风洞技术 .....	226
9.2.1	风洞与虚拟风洞的概念 .....	226
9.2.2	虚拟风洞的系统基本组成 .....	228

---

---

9.2.3	虚拟风洞软件工具 .....	235
9.2.4	虚拟风洞技术的发展方向 .....	236
9.3	虚拟现实技术在航天工效学研究中的应用 .....	238
9.3.1	空间实验室舱内视觉环境研究 .....	238
9.3.2	虚拟环境中人的操作判断及反应特性研究 .....	241
9.3.3	航天器交会对接人工控制设计与人一机结合 特性研究 .....	242
9.3.4	虚拟环境下的认知工效学研究 .....	245
	思考题 .....	256
	参考文献 .....	257

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 虚拟现实(VR)概念

### 1.1.1 VR 定义

国外与虚拟现实相关的术语很多,如人工现实(Artificial Reality)、虚拟环境(Virtual Environment)、赛博空间(Cyberspace)、遥现(Telepresence)、镜中世界(Mirror World)等。虚拟现实目前尚无统一定义,比较权威的解释来自汪成为等 1996 年在《灵境(虚拟现实)技术的理论、实现及应用》中给出的定义:虚拟现实(Virtual Reality, VR),是一种可以创建和体验虚拟世界(Virtual Environment)的计算机系统。虚拟世界是全体虚拟环境(Virtual Environment)或给定的仿真对象的全体。虚拟环境是由计算机生成的,通过视、听、触觉等作用于用户,使之产生身临其境的感觉的交互式仿真视景。虚拟现实与计算机图形学、图像处理与模式识别、智能接口、人工智能、多传感器、语音处理与音响合成、网络技术、并行处理和高性能计算机系统等多项技术密切相关。

### 1.1.2 VR 历史起源

和多数技术发展规律一样,虚拟现实也不是突然出现的,它是由客观需求所驱动的,并伴随计算机系统、计算机图形、显示技术、三维定位跟踪技术的成熟而自然诞生的。

1965 年美国 ARPA 信息处理技术办公室主任 Evan Sutherland 发表了《终极的显示》的论文,文中描述了如何把计算机屏幕作为一个通过它观看虚拟世界窗口的设想,后来此文被认为是虚拟现实研究的开端。同期,美国威斯康新大学的 Myron Kruger 对头盔显示器的原理进行了研究,



给出了 HMD 和 BOOM 概念,前者由 3 部分组成,即液晶显示器、声音输出装置和头部跟踪定位装置,后者像一个双目潜望镜,由活动关节的支架和显示器组成。1966 年 Sutherland 在 MIT 林肯实验室开始其头盔的研制工作,尽管比较笨重,而且不是立体显示,但作为一种雏形样机,在学术领域引起了很大的反响。1967 年北卡罗来那州的 BROOKS 和 Bell 实验室的 Michael Noll 分别进行了力反馈研究,能够监测用户与虚拟物体的碰撞,使得用户感受振动感觉反馈。20 世纪 80 年代,美国 VPL 公司的创始人 Jaron Lanier 首次提出了“Virtual Reality, VR”术语。随后,美国国防部组织了一系列的有关 VR 技术的军事仿真研究,取得了令人瞩目的研究成果——SIMNET,引起了广泛关注。20 世纪 90 年代,美国 NASA 也积极研究 VR 技术,并把 VR 主要应用在出舱活动、空间站操纵控制领域,最成功的例子是 HUBBLE 望远镜在轨更换 MRI 组件的地面 VR 训练,达到了非常好的实战效果。20 世纪 90 年代,计算机及相关技术的快速发展,交互设备不断创新,为虚拟现实的进一步发展打下了良好的基础。

### 1.1.3 VR 技术优点

VR 作为一门新兴人—机界面技术,其特点突出体现在以下方面:

(1) 界面更适于人。传统的人—机界面(HCI)多基于二维,人—机相对独立;VR 界面表现是三维立体,呈现给用户的信息更丰富、自然和亲切,人—机配合效率更高。

(2) 高度灵活性。VR 基于计算机,它继承了传统计算机仿真技术的优点,易于修改,通过修改软件模型,增减一些数据即可满足新任务的仿真模拟,比传统物理、半物理仿真更加灵活、方便。

(3) 突破环境限制。虚拟的景象和声响使人有身临其境之感,可以胜任传统仿真技术实现不了的或有危险性的研究项目,如地面模拟航天出舱活动。VR 通过虚拟现实进行视景变化,可以使得用户感觉到在一定程度上上的真实性,从而探索人体在模拟环境中的反应。

(4) 开发效率高。传统的产品开发周期长,只有生产样机模型后才能获得用户的反馈,然后修订改进;利用 VR 系统开发产品,不必生产事务样机,只需在可视的三维电子样机上进行浏览、交互,即可获得用户反