

[美] Joe Gradecki 著
何定 华宏 等译
王涌天 审校

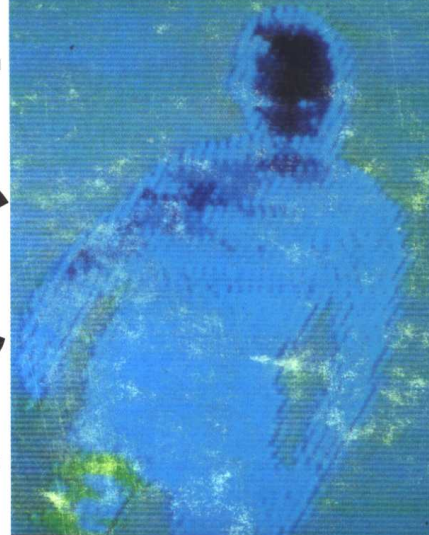
The Virtual Reality

CONSTRUCTION KIT

虚拟现实系统制作指南

指导您制作出
高水平的虚拟现实系统

Your complete
guide to building
cutting-edge
virtual reality
projects



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

内含软盘

The Virtual Reality Construction Kit

虚拟现实系统制作指南

〔美〕 Joe Gradecki 著

何定 华宏 等译

王涌天 审校

電子工業出版社

内 容 提 要

虚拟现实是一种具有浸没感的高级人机界面,它为人们提供了通过感觉、语言、手势等比较自然的方式与机器进行“对话”的系统和环境。

本书共分 17 章和 1 个附录,包括 18 个廉价的虚拟现实硬件方案的详细说明,并告诉读者如何使一些现有的硬件适于你的微机。本书所附软盘包括测试、调整与运行所需软件。本书为虚拟现实的爱好者提供了一条捷径。读者只需花费很少,即可白手起家,研制自己的虚拟现实方案。

本书内容翔实、文字流畅,不要求读者具有很多软硬件工作经验,同时书中所列的程序又可为程序员提供颇具价值的资料,适用于所有虚拟现实技术的爱好者和工程师。



Copyright©1994 by John Wiley & Sons, Inc.

Chinese Edition Copyright©1996 by Publishing House of Electronics Industry.

本书英文版由美国 John Wiley & Sons, Inc. 出版,版权为 John Wiley & Sons, Inc. 所有,中文版 1996 年由该公司授权予电子工业出版社独家出版。未经出版者书面许可,不得以任何形式复制或抄袭本书内容。

The Virtual Reality Construction Kit

虚拟现实系统制作指南

[美] Joe Gradecki 著

何定 译

王涌天 审校

责任编辑:郭立

*

电子工业出版社出版

北京市海淀区万寿路 173 信箱(100036)

电子工业出版社发行 各地新华书店经销

北京志达排版公司排版

北京朝报印刷厂印刷

*

开本:787×1092 毫米 1/16 印张:14.5 字数:371 千字

1996 年 11 月第 1 版 1996 年 11 月第 1 次印刷

印数:4000 册 定价:32.00 元(含磁盘一张)

ISBN 7-5053-3754-8/TP·1597

著作权合同登记号 图字:01-96-0870

译者序

虚拟现实(Virtual Reality,简称VR)是60年代在美国首先出现一项新技术,由于计算机硬件水平的飞速进步,这项技术在80年代末、90年代初得到了快速发展。虚拟现实是一种具有浸没感的高级人机界面,人能够通过多种感官渠道与它进行实时交互,这些渠道包括视觉、听觉、触觉、嗅觉和味觉等等。它使计算机从一种需要人用键盘、鼠标对其进行操作的设备变成了人处于计算机创造的环境中,通过感官、语言、手势等比较“自然”的方式进行“交互、对话”的系统和环境。

虚拟现实技术的应用前景非常广阔。它开始于军事领域的需求,在军事和航空航天领域的模拟和训练中起到了非常重要的作用。随着当今技术的高度复杂化,硬件系统的开发周期不断缩短,迫切需要一种灵活的、可升级的、网络化的模拟系统。VR系统在上述的各个方面均能很好地满足需要。另外虚拟现实技术在医疗、制造业、娱乐和教育等方面的应用也具有很大的潜力。可以想象,如果您能够进入到具有沉浸感的,并且有多种感官反馈的虚拟境界中玩DOOM游戏,那您肯定再也不会理睬二维屏幕的视频游戏了。而且虚拟现实本身是一种人机界面,它完全有可能在不久的将来把图形界面淘汰掉,就像图形界面把字符界面推下计算机界面的历史舞台一样。

目前,国外已经推出了许多比较成熟的软硬件产品。硬件如Virtual Research Systems公司的VR4头盔显示器,Ascension公司和Polhemous公司的头部跟踪系统,Virtual Technologies公司的CyberGlove数据手套,Crystal River Engineering公司的三维声音系统。软件如Sense8公司的WorldToolkit,MultiGen公司的MultiGen,SuperScape公司的VRT等。但以上产品有一个共同的特点,它们都非常昂贵,个人一般无力购买这些产品。

这并不是说我们只能对着虚拟现实望洋兴叹,本书为虚拟现实的爱好者提供了一条捷径。从这本书里,您可以读到白手起家,研制运动跟踪器、三维显示头盔、三维鼠标、三维音响系统的各种方案,也可以找到改造现成硬件使其能配合您的微机工作的方案,这些现成硬件包含任天堂的Power Glove,VictorMaxx公司为Sega游戏系统设计的新型StuntMaster显示头盔,Logitech公司的CyberMan等等,而您所需的花费将很少很少。

读者无需有程序编制或电子电路方面的工作经验!但是,如果您是虚拟现实技术的工程师,相信本书及所附软盘提供的程序会使您得到许多颇具价值的资料。

全书共有17章和1个附录。主要由何定、华宏翻译,由王涌天研究员审校。另外在翻译过程中得到了张诚平、胡樱、柴东林、王红涛的大力帮助,在此表示感谢。

1996年5月
于北京理工大学

目 录

引言.....	(1)
第 1 章 用户个人能够承受的虚拟现实.....	(3)
虚拟境界	(3)
如何才能得到虚拟现实的体验?	(4)
第一人称感觉的重要意义	(4)
实时操纵虚拟境界的重要意义	(7)
虚拟现实的真谛	(8)
幕后一窥	(8)
虚拟现实软件的定义	(11)
结论	(13)
第 2 章 将 Mattel Power Glove 连至您的微机上	(14)
Power Glove 的制作	(14)
如何得到 Power Glove	(15)
把 Power Glove 转移到微机平台上工作	(16)
并行接口方法	(16)
测试	(23)
串行接口方法	(23)
Power Glove 及其与计算机连接的故障排除	(24)
用 Power Glove 玩游戏	(24)
Power Glove 的技术要点	(25)
超声波定位系统	(25)
对 Power Glove 编程	(27)
低分辨率模式	(27)
高分辨率模式	(29)
Power Glove 编程范例	(32)
REND386 范例	(33)
第 3 章 使用标准鼠标和制作三维鼠标	(38)
鼠标	(38)
软件	(39)
动作计数器	(40)
采用普通鼠标模拟三维鼠标	(40)
制作三维鼠标	(40)
完整的手	(44)
结论	(44)

第 4 章 Global 3D Controller 和 Logitech 的 CyberMan	(45)
操作	(45)
顶部小球	(46)
触觉反馈	(46)
对 Global 3D Controller 编程	(47)
初始化	(47)
改变模式	(47)
获取数据	(48)
激活反馈	(48)
初始化代码	(49)
改变模式的代码	(49)
读控制器的代码	(50)
触觉反馈代码	(51)
使用 CyberMan	(52)
对 CyberMan 编程	(52)
获取 SWIFT 静态设备数据和驱动程序支持状态	(52)
结论	(58)
第 5 章 反馈和触觉	(59)
我们如何使用反馈	(59)
反应机械刺激的感觉器官	(59)
本体感觉器官	(60)
VR 反馈	(60)
力反馈	(60)
触觉反馈	(63)
热反馈	(65)
结论	(66)
第 6 章 把液晶光阀眼镜连接到微机上	(67)
在虚拟现实显示体视图象的关键问题	(67)
分时显示器	(68)
光阀眼镜的接口	(69)
编写自己的软件	(71)
视差(Parallax)	(72)
潜在的问题	(74)
旋转图象	(75)
离轴或照象机式投影	(75)
轴上模式	(77)
软件	(78)
REND386	(79)
光阀眼镜的局限	(81)

第7章 把 StuntMaster 头盔显示器连接到微机上	(82)
技术说明	(82)
制作 StuntMaster 头盔的接口	(82)
输出针	(84)
视频接口	(85)
音频接口	(85)
头部跟踪器接口	(85)
电源接口	(85)
连接系统	(85)
软件接口	(86)
精度	(88)
结论	(88)
第8章 制作头盔显示器	(89)
当前的头盔显示器技术	(89)
头盔显示器的工作原理	(90)
显示器	(91)
光学系统	(94)
制作自己的头盔显示器	(97)
选购合适的 LCD	(98)
拆卸便携式电视机	(98)
选择合适的光学系统	(99)
光学系统定位	(101)
制作头盔显示器的外壳	(101)
为头盔显示器提供良好的视频信号	(103)
试用头盔显示器	(106)
制作单视场头盔显示器	(106)
程序员注意事项	(107)
结论	(107)
第9章 三维声音理论	(108)
三维声音简介	(108)
混响时间差(Interaural Time Differences)	(108)
混响压力差(Interaural Pressure Differences)	(113)
波谱信息(Spectral Cues)	(114)
头部相关传递函数	(115)
配置需求	(116)
结论	(117)
第10章 制作一个三维声音系统	(118)
Gravis Ultrasound 系统	(118)
用 Gravis Ultrasound 三维声音卡制作三维声音系统	(118)

第一步:记录声音	(118)
第二步:制备声源	(119)
第三步:标题文件	(120)
第四步:测试声音	(121)
第五步:把声音加入到我们编制的程序中	(121)
第六步:装载三维声音	(122)
第七步:定位	(122)
第八步:启动与停止	(123)
第九步:文件初始化	(123)
制作自己的三维声音系统及其编程	(124)
制作数模转换器	(124)
集成式的数模转换器	(125)
电路接口	(126)
控制寄存器	(128)
软件接口编程	(128)
输出乐曲	(131)
乐曲定位	(132)
利用预先制作的声源	(134)
结论	(135)
第 11 章 声音识别和语音合成	(136)
Covox 声霸卡	(136)
工作原理	(136)
给虚拟境界中加入语音支持	(138)
语言合成	(139)
第 12 章 制作连杆式头部跟踪器	(140)
头部跟踪技术	(140)
机械式头部跟踪器	(140)
光学式头部跟踪器	(141)
超声波式头部跟踪器	(143)
磁场式头部跟踪器	(144)
制作一个连杆式头部跟踪器	(144)
计算机接口	(144)
将身体的运动转化为数字量	(145)
电路	(145)
制作连杆	(146)
头部跟踪设备	(147)
使用连杆式头部跟踪器	(151)
头部跟踪软件的程序员指南	(151)
头部运动	(153)
结论	(155)

第 13 章 利用 Power Glove 制作头部跟踪器	(156)
Logitech 的红贵族	(156)
利用 Power Glove 制作头部跟踪器	(156)
俯仰/侧倾	(157)
接收器	(157)
完善系统	(158)
软件	(158)
第 14 章 绘制软件	(159)
绘制软件	(159)
用户输入	(159)
顶点的变换和投影	(160)
在深度方向对物体进行排序	(161)
消除隐藏面	(161)
着色	(162)
画图	(162)
REND386	(162)
创建一个物体	(165)
创建一个 PLG 文件	(167)
遨游	(169)
第 15 章 打壁球	(170)
打壁球	(170)
编制壁球游戏的程序	(170)
设备的制作	(171)
球的运动	(178)
移动身体和观察点	(180)
移动控制	(181)
碰撞检测	(184)
结论	(185)
第 16 章 公园漫步	(186)
运动	(186)
将脚踏机或自行车搬到 VR 中去	(187)
运动敏感电路	(187)
接收电路	(188)
探测真实的运动	(189)
解释探测器的读出数据	(190)
使用 PARK 程序	(191)
操纵杆的编程	(191)
初始化	(191)
操纵杆的读出	(192)

第 17 章 机器人的战争游戏	(194)
游戏的编程	(194)
游戏场地	(194)
障碍物	(196)
机器人	(197)
运动	(200)
碰撞检测	(202)
结论	(203)
附录 安装软盘上的软件	(204)
后记	(219)

引言

人们常用的形容词“物美价廉”对于虚拟现实工业是至关重要的。媒介宣传力图使我们相信虚拟现实就是《割草人》(Lawnmower Man)之类的电影中那些计算机生成的画面。我喜欢那部电影,但那些所谓的虚拟现实画面是在价值数十万美元的计算机上用数百小时的时间制作的,这显然超出了我个人的财力和精力。

这并不是说我们只能对着虚拟现实望洋兴叹,我们需要有些创造力。欢迎您进入“家庭实验室”虚拟现实的奇妙世界。从这本书里,您可以读到白手起家,研制运动跟踪器、三维显示头盔、三维鼠标、三维音响系统的各种方案,也可以找到改造现成硬件使其能配合您的微机工作的方案,这些现成硬件包含 Power Glove, VictorMaxx 公司为 Sega 游戏系统设计的新型 StuntMaster 显示头盔, Logitech 公司的 CyberMan 等等。

读者无需有编制程序或电子电路方面的工作经验!

仅用鼠标和显示器,您就可以把自己沉浸在本书所附软盘中提供的各种虚拟“境界”里,但我劝君更上一层楼,从书中提供的 14 个硬件方案中任选几个组合起来,体会一下完整的虚拟现实的感觉吧。

软盘内含

本书所附软盘提供了把书中各种硬件方案与微机配合运行时所需的所有软件,以及许多完整的、可以运行的虚拟境界程序。我还为程序员提供了源程序和编程技巧。利用软盘上的虚拟境界程序,您可以:

- 打一场紧张的虚拟壁球赛
- 穿上坚实的盔甲,参加一场殊死的战斗(可用调制解调器联机运行)
- 在子夜的石林中游,在全副武装的敌人发现你之前,找到并消灭他们
- 骑车穿过令人心旷神怡的虚拟现实公园

本书着重实践,并不把重点放在有关虚拟现实系统的理论上,而是循序渐进地讲解一些切实可行的虚拟现实技术。我期望您“挽起衣袖”,做出硬件,插在您的微机上,再去调用和运行软盘上的软件,享受一下最先进的自制虚拟现实系统。我在本书中介绍的所有方案都已经过实验证实可行,我已亲手一一把它们实现,并自己编写和调试了每一行程序。

本书结构

每章集中讲述一个硬件方案,说明了该器件的工作原理,引出所需零部件和提供厂商,给出清晰的步骤和许多图片以指导制作,并介绍如何与软盘上的软件配合使用。

第 1 章简述构成一个完整的虚拟现实经历所需的基本要素。

第2章开始讨论输入器件和触觉。说明真正的虚拟现实是通过对物体的操纵来实现的,然后我们为 Mattel 公司生产的 Power Glove 制作一个接口,以便把它用在微机上。

第3章说明如何用—个普通鼠标和几个 Power Glove 上的元件制作三维输入设备。

第4章描述在虚拟现实中使用 Global 3-D Controller 和 Logitech 公司生产的 CyberMan 输入设备的方法,并为程序员提供了许多编写驱动程序的技巧。

第5章阐述反馈原理。我们分析各种触觉反馈、力反馈、热反馈系统,以及制作自己的反馈系统的方法。

第6章探讨视觉问题。我们首先介绍双眼体视理论和实现双眼体视所需的技术,并给出制作光阀眼镜和微机间接口的指南。

第7章帮助我们用—个简单的导线把 VictorMaxx 公司的 StuntMaster 显示头盔接在微机上使用。

第8章讲解自制—个实用型三维头盔显示器所需的原理和步骤。

第9章初探三维音响模拟的理论和实践。

第10章介绍先进的 Gravis Ultrasound 3-D 声卡,以及用少数几个元件自制三维音响系统的方法。同时,我们讨论声音生成的原理,和控制自制音响系统发声的必要软件。

第11章简述如何在我们的虚拟境界中加入声音识别功能。想象—下,您将能和那些虚拟的生灵讲话,并让它们回答!

第12章指出如何使您真正进入—个虚拟境界。使用很容易买到的零部件,花费不到 30 美元,您就可以制作—个连杆式头部跟踪器,它可以跟踪您头部的转动或您手的位置。

第13章从另一个角度讨论头部跟踪问题。利用数据手套的一部分可以制作出—个简单的头部跟踪器。

第14章综合深入地探讨控制虚拟境界,实现与其交互的必要的软件。

第15章详述软盘上提供的虚拟壁球游戏。程序员们会从对这个虚拟境界设计的详尽说明中得到不少启示。

第16章提示您如何将—辆自行车、—个健身脚踏车或行走平台接在微机上,在虚拟的公园中漫游。

第17章向您展示子夜黑暗的危險世界,—个虚拟敌人正在四处搜寻,试图置您于死地。

附录说明了软盘软件的安装方法。

请开始工作吧! 拿起您的工具箱,选好您的方案,让您自己沉浸在虚拟现实!

第 1 章 用户个人能够承受的虚拟现实

幻想一片一望无际的海滩,卷起您的裤腿站在水边,一步步向海中走去。您觉得脚被浸湿,不久水已齐腰。接着,海浪开始撞击您的身躯,把您向后抛去。仰望在您头顶上方翱翔的海鸥,您在心里想,它们是否把我当成个目标?太阳在远方徐徐落下,余晖把海面染成红色。噢,您突然想起您是在一个远离文明世界的荒岛上,这里没有电,但您醒悟得太晚了,太阳已沉入海平线,周围一片黑暗,只有一轮皎洁的明月高悬在您右方的天空,把洁白的月光洒在您身上。

这是现实!属于您的现实。以上景致的描述并不十分细腻,您却可能已在心中给出了那个美丽海岛的图画。这就是人的本性。请允许我提个问题:您的图画是三维的吗?您能看见那徐徐落日,或那远空明月吗?如果您能看见,那么这心中的图画是不是现实呢?通过幻想,您是否觉得就像到了那个地方?这种心灵活动能够使许多人心旷神怡,他们感到自己从繁忙的办公室逃出,来到一个热带天堂。他们创造了一个新的现实,这个现实就在他们心中。但如果那景象细致入微,如果您能看到自己用手拾起一片贝壳,那么这个新的现实会变得多么活灵活现,您可以说您已实际去过了那个海岛。

这就是被称为“虚拟现实”的技术的意图所在。它是一种现实,因为您能身临其境,您可从看到自己身体的部分和其它物体,而更妙的是,您可以对其进行控制操纵,我们用虚拟这个形容词来描述,因为这是一种建立在感觉上的现实,在其中您可以做在真实世界中做不到的事。为了对虚拟现实下一个明确的定义,我们需要先看看它的构成。



虚 拟 境 界

在虚拟境界中我们将经历各种新的现实体验。它们包含了我们能够看见和操纵的各种物体,它们也使我们能够体验真实世界中不可能的事情。比如,您一生中几曾穿树而过?说到树,图 1.1 展示了一个虚拟境界的例子,这个境界来自您将在第 16 章中研制的虚拟现实程序。

在虚拟现实研究领域,正开始讨论关于某些常用术语的精确定义的问题。以大家都在不同程度上熟悉文字处理系统为例,这类计算机软件通常被称为“应用软件”,用来输入文字。此外,我们有一些称作“计算机游戏”的软件用于娱乐;又有一些“工具”软件来辅助我们或我们的计算机更有效地工作,比如用于硬盘格式化的程序就是一个工具软件。因此,在广义的计算机领域中,大家普遍接受这些术语的定义。

而在虚拟现实领域,与之有关的任何计算机软件都被称为一个“境界”。这些境界程序一般没有什么功能,您只能在其中游历,探查内含的事件。这本来已令人费解,而软件商店把所有能提供三维体感感觉的东西一律称为“虚拟现实”,更使其混淆不清。为结束这种混乱,不愿在此为不同的虚拟现实软件提出相应的定义,但我们必须首先搞清虚拟现实软件的基本



图 1.1 按实际绘制的公园景象

组成,以及什么是真正的虚拟现实感受,产生虚拟现实感受的要素。



如何才能得到虚拟现实的体验?

一种新技术的基本构成的确定必须经过深思熟虑,本领域的专家们也会为此展开热烈争论。我以一个从事过基层工作的人的观点提出我对虚拟现实程序的实质的论断。我曾特意编写过应用程序、游戏、工具和虚拟境界等各种软件,以便分清其中的差别,在脑海中建立清晰的概念。

一个真正的虚拟现实程序必须包含以下两个基本要素:

- (1)给用户以第一人称的感觉,并有实时随意活动的自由;
- (2)能够实时地操纵和/或改变该虚拟境界。

本书中的虚拟现实硬件方案和软盘上的软件的设计均可以在虚拟境界中给您第一人称的感觉,使您能在该境界中漫游并实时地对您发现的物体就行操作。

第一人称感觉的重要意义

为了说明此重要概念,请允许我举个例子,假设您在注视着一个计算机屏幕,上面显示的是图 1.1 中的公园景象。当然,树叶是深棕和绿色的,草色碧绿,天空蔚蓝,其它物体也已着上了正确的颜色。您的视点设置得就像您在亲眼观察这个公园(而不是从一个代表您的小人形的上方观察),您的眼前是一个代表您的手的物体。这样您就建立起了一个“用户的第一人称感觉”。这是市场上大多数三维游戏软件(如 Ultima VI 或 Wolfenstein 城堡)中常用的做法。

本要素的第二个要求是我们必须能够把视点移到包含了公园景象的三维坐标系统中的任意一点,正像在真实世界中,您可以随意走动,踮起脚尖或蹲下身子以得到不同的视角。请注意一个虚拟现实的公园景象不是一组平面的二维的位图,而是一组您能在其中走动的三维物体。

让我告诉您一个小秘密。在 Wolfenstern 城堡一类游戏中的“三维”物体不过是一些从 4 到 8 个不同角度画出的位图。如图 1.2 所示,如果我们从图 1.1 中取出一棵树放在一个八边形中间,则 Wolfenstern 类的游戏只允许您从这八个面观察此树。您不能向某一方向做小量移动,而只能移到八边形的另一个方向上去。在一个真正的虚拟现实程序里,您可以随意移动到任意位置。比如您可以变成一只蚂蚁从树根向上观察树叶,其景象如图 1.3 所示。您甚至可以一边东张西望提防可恶的蜘蛛,一边开始沿着树干往上爬。或者您可以变成一只老鹰,向一位没有防备的旅游者猛扑,再飞向树梢,舒服地坐在树枝上,如图 1.4~1.6 所示。

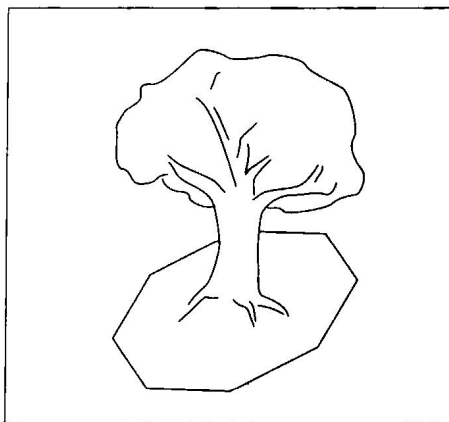


图 1.2 位图的八个视角

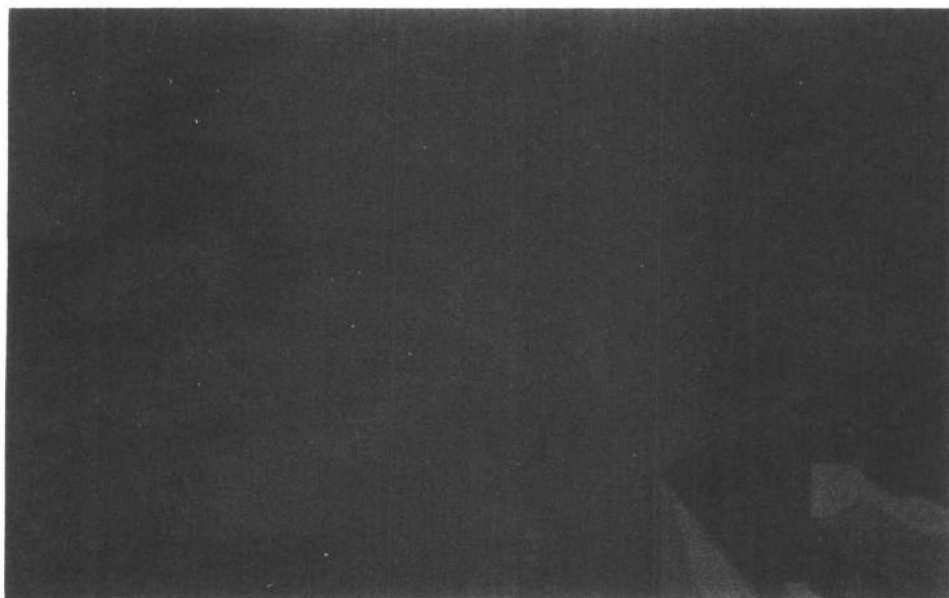


图 1.3 从蚂蚁的视角观察虚拟树

在另一类被称为“可视化程序”的软件中,您也能够改变视角,但不能实现实时改变,而实时的视点移动对模拟我们真实生活中的行走是至关重要的。使用虚拟现实软件时,您不必被动地遵循什么预先规定的路径。如果您想向前走,突然向左转,再在空中飞翔 30 米,您尽可随意。

公平地说,像 Wolfenstern 游戏那样用选择性位图技术可以提供质量很高的图形。

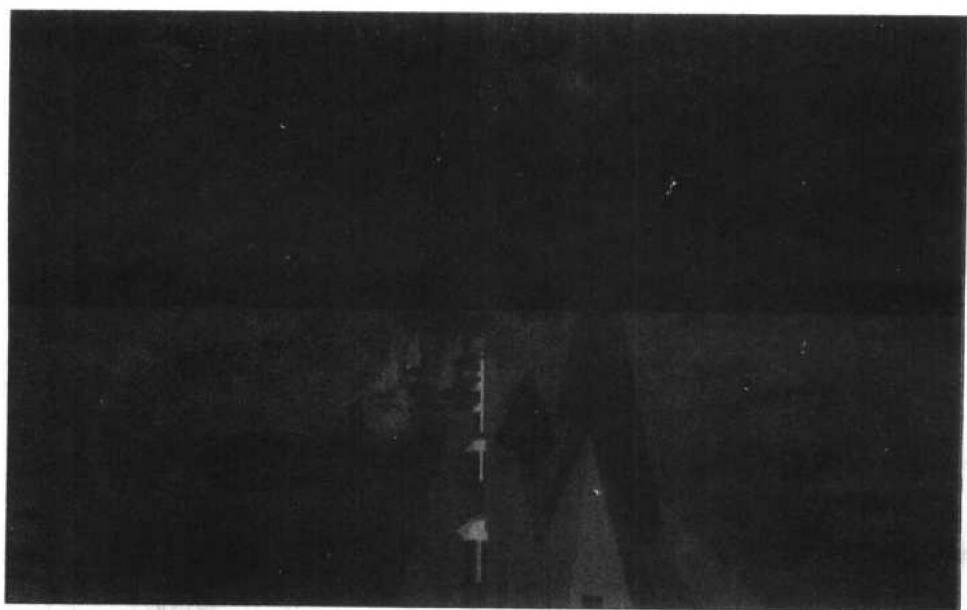


图 1.4 鹰飞行中的景象之一

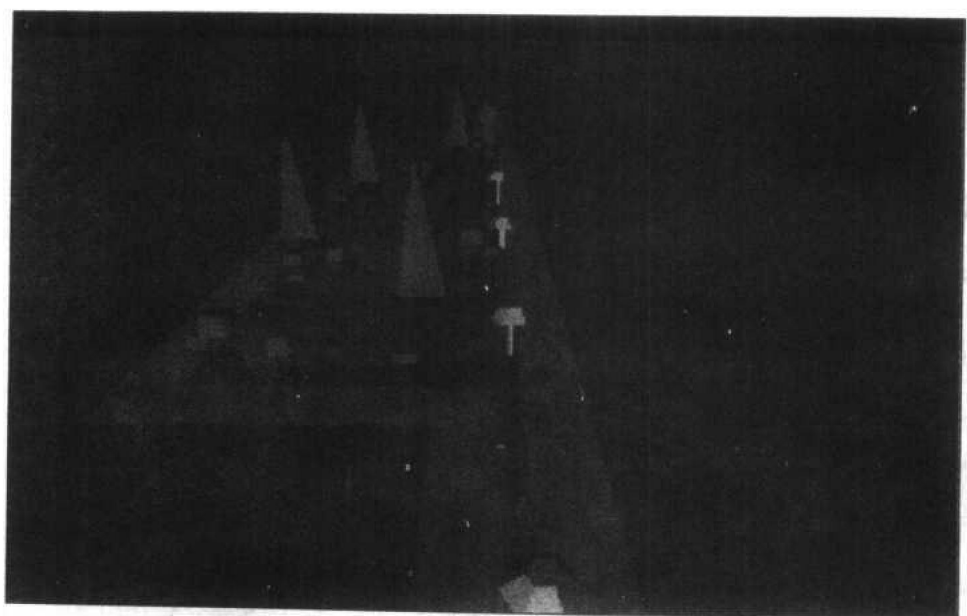


图 1.5 鹰飞行中的景象之二

Wolfenstein 中物体的细致程度比一些高级虚拟现实设备中的还要好。但当要求程序提供实时的“随意”运动时,没有任何东西可以取代虚拟现实。确立这一观点后,就可以开始讨论虚拟现实的第二个要素。

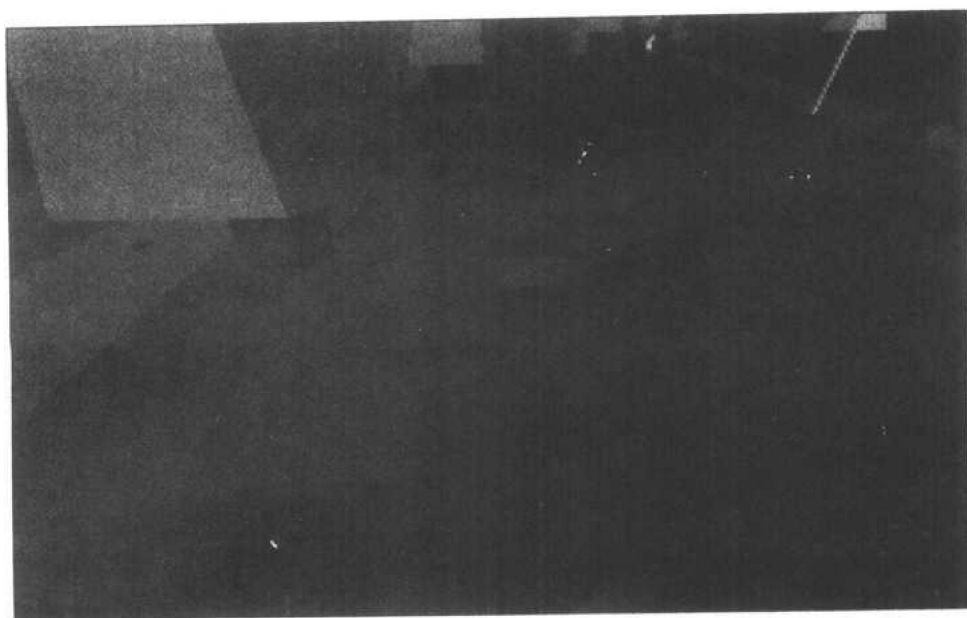


图 1.6 鹰飞行中的景象之三

实时操纵虚拟境界的重要意义

虚拟现实程序的第二个基本要素是在前一个基础上进一步提出的。在许多程序中您都可以实时移动,但允许您直接对虚拟境界中的物体进行操作的就为数不多了。

在实际生活中,您时刻都有能力影响您身边的事物。比如,您去商店时,可以选择开车或走路去。但在做决定改变周围环境的过程中,您总是在对您身边的东西进行操作。如果想开车去商店,您首先要找到车钥匙,然后要锁上家门。这些动作一直持续到您从商店回到家中,而这时您又需要决定如何安置买回的东西了。

在上述整个过程中,您一直在对不同的物体进行操作。在一个虚拟现实,您应具有同样的能力。而虚拟现实的美妙之处在于您能决定哪些物体是可以操作的,哪些不可以。您可以把环境设置为找到钥匙后却不能接近而取到手;您也可以把自己设置为能够移山填海的大力神。

虚拟现实程序的这个要素是最为重要的,即由环境的研制者来控制各种物体如何相互作用,以及如何被操作。这种控制能力十分有用。美国航天局正在创建自由号空间站,它将成为美国宇航员的太空实验室和生活中心。在空间站的研制过程中,所有的部件都必须经过失重状态下的测试以观察其变化。虽然科学家们已经发展了多种模拟失重条件的方法,但没有一种是完美无缺、对任何情况都能适用的。我们以动力系统为例,不难设想自由号空间站将采用太阳能和某种核反应堆驱动,这种系统用在潜水艇上已有很好的工作记录。但核反应堆的测试颇为棘手,可供选择的方案包括:(1)实际制造一个反应堆并在水箱中进行测试;(2)将研制的反应堆发射到太空中去运行一段时间以确定失重的影响;(3)使用虚拟现实技术。如果我们只需考虑失重对反应堆发电能力的影响,使用第一种方案比较合理,可以确定