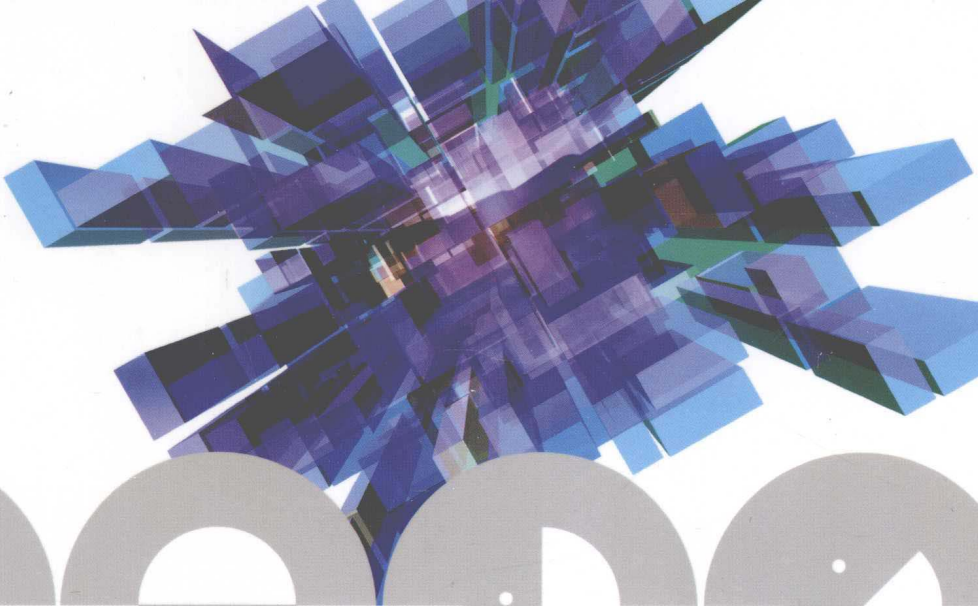
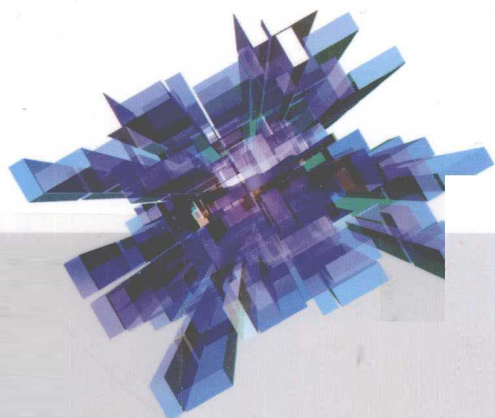


3D Scene Simulation and Visual Modeling

三维视景仿真 可视化建模技术

李俊山 王蕊 李建军 著



科学出版社

三维视景仿真可视化建模技术

李俊山 王 蕊 李建军 著

科 学 出 版 社

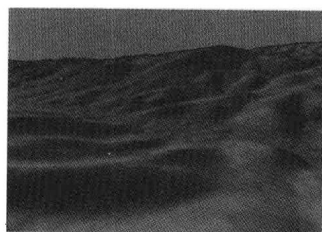
北 京



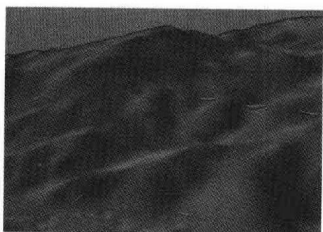
图 1 美军红旗军事演习模拟系统



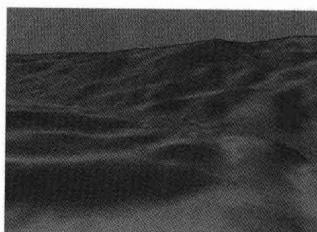
图 2 南方某地区重建地形



(a) 原始数据重建地形



(b) 未消除裂缝的局部结果

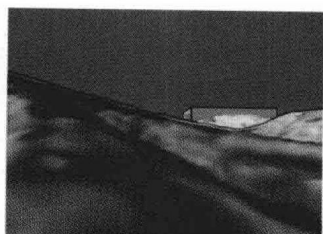


(c) 消除裂缝后结果

图 3 地形简化实验结果



(a) 原始地形



(b) 生成增量地平线



(c) 最终状态

图 4 增量地平线的生成

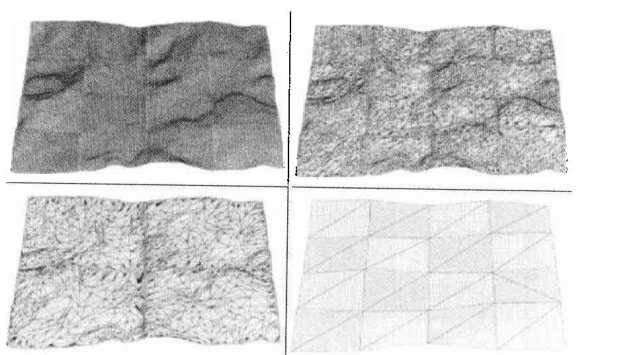
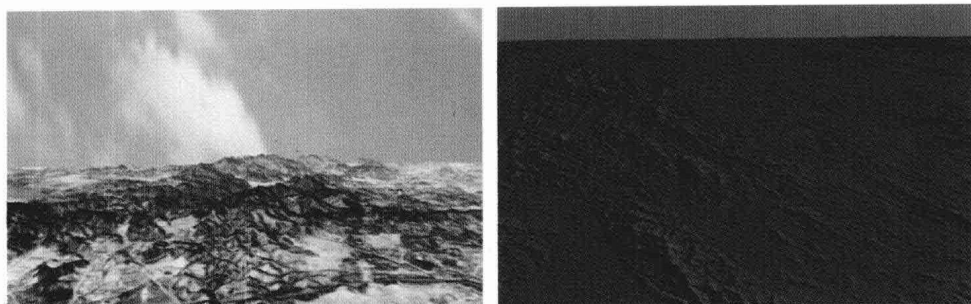
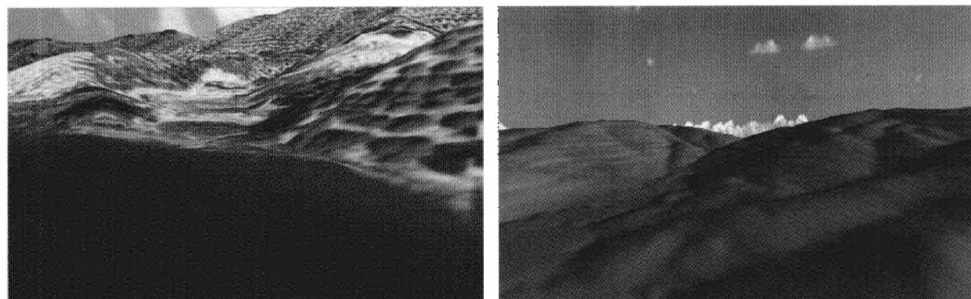


图 5 网格的分割方法

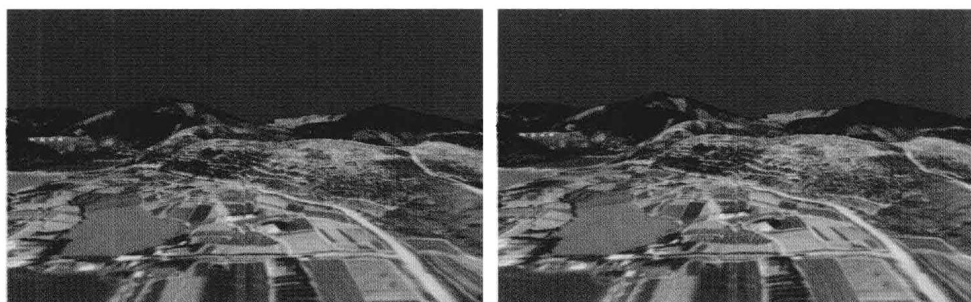


(a) 两组场景数据的鸟瞰图



(b) 实时漫游过程中的两帧图像

图 6 实验结果



(a) 四叉树多分辨率纹理映射算法结果

(b) 传统算法的结果图

图 7 不同算法的结果比较图

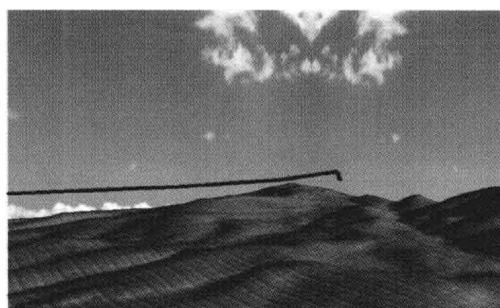


图 8 地形跟随实时仿真结果

前 言

随着计算机技术、摄影测量与遥感技术、卫星技术和现代电子技术的迅猛发展,现代测量、信息获取和信息处理等技术及手段发生了革命性的变革和功能与性能上的极大提升,使得获取各种高精度三维视景数据、高分辨率数字几何高程数据以及影像纹理数据等成为可能;伴随着计算机图形学、图像处理、计算机视觉、可视化等技术的进步,为三维视景的图形学表示、图像表示、结构信息表示、体视特征表示,以及视景三维建模等提供了新的解决方案;同时,由于计算机仿真、高性能计算处理、图形图像生成、信息合成和三维显示等技术的飞速发展,为建立非常逼真的三维仿真效果、重建逼真的大范围三维场景、构建基于可计算信息的视觉与听觉的实时互动和身临其境的三维交互环境提供了技术支持和条件。三维视景仿真可视化建模技术已经成为当前的热点课题和应用最为广泛的实用技术之一,并在军事演练、城市规划、建筑设计、影视制作、模拟驾驶、大型工程漫游、名胜古迹虚拟旅游、武器研制、模拟训练以及交互式娱乐仿真等领域得到了十分广泛的应用,具有广阔的应用前景。

三维视景仿真可视化建模是虚拟现实的重要表现形式,虚拟现实是三维视景仿真可视化建模的延伸和高级阶段,因此涉及众多的技术领域和交叉学科技术问题。本书从“着重于达到非常逼真的三维仿真效果”和“更侧重于视觉和听觉的身临其境”的三维视景仿真技术内涵的角度,主要研究和探讨三维视景仿真中的可视化建模关键技术。

本书共分为3篇9章。第一篇(第1章)介绍视景仿真的概念、三维视景仿真数据的获取和主要建模方法,并构成了后续各篇内容的基础;第二篇(第2~5章)主要针对三维仿真实体模型的可视化问题,采用ICP匹配迭代算法、Delaunay三角剖分算法、螺旋增量算法、基于径向基函数的曲面插值算法等理论和方法,对三维仿真模型处理中的配准、曲面重建、孔洞修复、模型简化等问题进行了系统研究,建立了多种有创新性的可视化建模方法,对于推进三维视景仿真可视化建模技术和虚拟现实技术的发展与进步具有重要的参考和应用价值;第三篇(第6~9章)以国防应用中的巡航飞行地形跟随应用为背景,主要采用大范围三维场景实时仿真技术、三维重点目标重建技术、可见性判断算法、大规模地形数据调度与纹理映射技术等,对大范围仿真场景的简化、可见性、数据调度与纹理映射以及地形跟随等技术进行了系统研究,提出和建立了多种有创新性的大范围场景地形重建、大规模真实感场景重建和地形跟随算法,实现了轨迹光

滑、连续、实时的紧密地形跟随，保障了飞行器飞行的安全性。全书内容在三维视景仿真可视化建模的理论、技术和方法及应用技术方面具有典型的代表性。

本书内容是作者承担的有关装备可视化和国防项目研究成果的总结。在本书内容的研究和撰写过程中，参考和引用了一些文献中的观点和素材，在此向这些文献的作者表示衷心的感谢。

限于作者水平，书中难免存在不妥之处，敬请读者批评指正。

李俊山

2011年10月1日于西安

电子信箱：lijunshan403@163.com

目 录

第一篇 三维视景仿真及可视化建模

第 1 章 概述	3
1.1 视景仿真	3
1.1.1 视景仿真概念	3
1.1.2 视景仿真技术的发展动态	4
1.1.3 视景仿真技术的应用	6
1.2 常用的三维视景仿真数据获取技术	8
1.2.1 GPS 测量技术	8
1.2.2 摄影测量技术	11
1.2.3 激光扫描测量技术	12
1.2.4 遥感技术	14
1.2.5 应用地球物理技术	16
1.3 视景仿真数据可视化建模关键技术	17
1.3.1 点云配准技术	17
1.3.2 曲面重建技术	19
1.3.3 网格孔洞修复技术	21
1.3.4 网格简化技术	22
1.3.5 可见性判断算法	24
1.3.6 大区域纹理映射技术	25

第二篇 三维仿真实体模型的可视化建模技术

第 2 章 散乱点云的配准技术	29
2.1 点云的局部配准策略	29
2.2 点云数据的几何属性估计	30
2.2.1 k -邻域的建立	31
2.2.2 法矢量估算	32
2.2.3 曲率估算	32
2.3 基于几何特征的点云局部配准算法	34
2.3.1 提取配准点	34

2.3.2	点云初配准	35
2.3.3	基于 ICP 算法的二次配准	37
2.3.4	配准误差度量	38
2.3.5	实验分析	39
2.4	点云的全局配准策略	42
2.4.1	视角分组	42
2.4.2	构造局部最优点	43
2.4.3	全局配准算法	45
2.4.4	实验分析	45
第 3 章	散乱数据点的网格曲面重建技术	48
3.1	问题的提出	48
3.2	相关技术	49
3.2.1	Voronoi 图与 Delaunay 三角剖分	49
3.2.2	螺旋生长法	51
3.3	曲面重建算法描述	52
3.3.1	相关定义	53
3.3.2	重采样	53
3.3.3	网格曲面重建	56
3.4	数据存储结构	60
3.5	基于重采样的混合曲面重建算法	61
3.6	实验分析	61
3.6.1	重采样	61
3.6.2	网格曲面重建	62
第 4 章	网格曲面中的孔洞修复技术	65
4.1	问题的提出	65
4.2	预处理	66
4.3	孔洞识别	67
4.3.1	三角网格模型中常见的几种孔洞类型	67
4.3.2	孔洞检测	68
4.4	多类型孔洞总体修复方法	69
4.4.1	基本思想	69
4.4.2	常用的插值函数	70
4.4.3	建立基于径向基函数的局部曲面方程	74
4.4.4	确定约束点区域	75
4.4.5	局部曲面采样	77

4.4.6 孔洞区域的三角剖分及法向调整	77
4.4.7 孔洞区域特征增强	78
4.5 不同类型的孔洞修复	80
4.5.1 一般孔洞的修复	80
4.5.2 岛屿孔洞的修复	80
4.5.3 非封闭孔洞的修复	81
4.6 实验分析	83
第5章 三角网格模型简化技术	87
5.1 问题的提出	87
5.2 基于 SOFM 神经网络的几何模型的区域分割算法	88
5.2.1 自组织特征映射神经网络	88
5.2.2 三维几何模型中 SOFM 相关参数的确定	89
5.2.3 算法实现过程	91
5.2.4 过分割区域聚合	92
5.3 基于区域分割的三维模型边折叠简化算法	92
5.3.1 相关内容	92
5.3.2 新顶点位置	97
5.3.3 边的折叠代价	98
5.3.4 各区域简化程度控制及局部效果调节	99
5.4 基于区域分割的三维几何模型简化算法	100
5.5 实验分析	101
5.5.1 基于 SOFM 神经网络进行区域分割的实验验证	101
5.5.2 与自适应区域生长算法的对比实验	101
5.5.3 基于区域分割的简化算法的实验验证	102
5.5.4 算法执行时间与形变误差比较算法执行时间及形变误差比较	105

第三篇 大规模仿真场景可视化建模技术

第6章 大范围场景简化方法	109
6.1 基于金字塔结构的地形绘制算法	109
6.1.1 金字塔分层结构	109
6.1.2 基于金字塔结构的 LOD 地形简化算法	110
6.1.3 基于视场范围的简化	112
6.1.4 层次间裂缝的消除	113
6.1.5 实验及算法性能分析	115
6.2 基于混合数据结构的简化算法	116

6.2.1	四叉树结构地形数据表示	117
6.2.2	基于四叉树结构的地形分块	118
6.2.3	基于四叉树的 TIN 网格生成算法	119
6.2.4	数据结构设计	122
6.2.5	实验结果分析	123
第 7 章	大规模复杂场景的可见性	126
7.1	可见性计算方法分析	126
7.1.1	可见性问题面临的难点	127
7.1.2	常用算法分析	128
7.2	视域剔除与背向面剔除	133
7.2.1	视域剔除算法	133
7.2.2	背向面剔除	134
7.3	基于特征的遮挡剔除方法	135
7.3.1	地形特征的提取	135
7.3.2	基于增量地平线的遮挡剔除算法	140
7.4	实验结果分析	144
第 8 章	大规模地形数据调度与纹理映射技术	147
8.1	大规模地形数据调度算法	147
8.1.1	大规模地形数据处理技术	147
8.1.2	基于网格分割的数据存储与调度	152
8.2	基于四叉树的多级纹理映射技术	156
8.2.1	多分辨率纹理映射的主要方法	156
8.2.2	基于四叉树的纹理表示	157
8.2.3	多分辨率纹理计算	158
8.2.4	纹理调度算法	159
8.3	实验结果分析	164
第 9 章	巡航仿真系统及其地形跟随技术	166
9.1	巡航仿真系统组成及功能	166
9.2	地形跟随技术	167
9.2.1	地形跟随技术的实现	168
9.2.2	基于局部熵的地形高程数据处理	168
9.2.3	快速曲率限制平滑算法	169
9.2.4	实验结果分析	171
参考文献		173

第一篇 三维视景仿真及可视化建模

视景仿真技术是近几年来随着计算机技术与仿真实理论的发展而发展起来的一门新兴学科，其采用计算机图形图像技术，根据仿真的目的，构造仿真对象的三维模型，并在真实的环境中达到逼真的仿真效果。由于视景仿真具有真实性、逼真性，其已越来越多地受到各行各业的青睐。

本篇主要对视景仿真的定义、特点，三维视景仿真数据的获取，以及主要建模方法进行了分析研究，内容由视景仿真的概述、三维视景仿真数据的获取方法及视景仿真数据的主要建模方法等三部分组成。

首先，给出了视景仿真的定义和功能，并介绍了这几年来视景仿真技术在国内外外的研究动态。

接着，详细介绍了三维视景仿真数据的获取方法，为有效地进行数据的可视化建模研究奠定了必要的基础。

最后，对仿真数据的主要可视化建模方法进行了详细的分析和研究，为进一步解决可视化建模中存在的问题提供了必要的铺垫。

总体来说，本篇内容是本书后续各篇内容的基础。

第 1 章 概 述

三维视景仿真技术是以计算机仿真技术、计算机图形学、图像生成技术、信息合成技术、三维显示技术等为基础而发展起来的一门新兴学科分支，其目的是通过视景的图形学表示、图像表示、结构信息和体视特征表示，以及视景三维建模等，构造仿真对象的三维模型；通过视景的实时生成等再现真实的环境，获得逼真的三维仿真视觉效果；为用户创建一个逼真、实时互动的三维交互环境。

三维视景仿真的关键是基于三维视景仿真数据的可视化建模技术，而可视化建模的基础是三维视景仿真数据获取。

1.1 视 景 仿 真

1.1.1 视景仿真概念

计算机仿真又称全数字仿真，是根据相似原理，利用计算机来逼真模仿所研究系统中的研究对象，将研究对象进行数学描述，建模编程，并且在计算机中运行实现。视景仿真是计算机仿真的重要分支，其主要特征是通过计算机技术、计算机图形学、图像处理及生成技术、信息合成技术、三维显示技术等高新技术的综合运用，着重于达到非常逼真的三维仿真效果，使用户产生基于可计算信息的视觉与听觉的身临其境的交互环境，以及“沉浸”于等同真实环境的感受与体验。

视景仿真以构造仿真对象的三维模型，再现仿真对象的真实环境，达到非常逼真的仿真效果为主要目的，其实现思路主要分为视景仿真建模和视景仿真驱动两种。视景仿真建模主要包括模型设计与实现、场景构造与生成、纹理设计制作、特效设计等，主要要求是构造出逼真的三维模型和制作逼真的纹理和特效。视景仿真驱动主要包括场景驱动、模型调度处理、分布交互、实时大场景处理等，主要要求是高速逼真地再现仿真环境，实时地响应交互操作等。

目前，视景仿真作为计算机技术中最为前沿的应用领域之一，已经广泛应用于军事演练、城市规划仿真、大型工程漫游、模拟驾驶、名胜古迹虚拟旅游、模拟训练以及交互式娱乐仿真等领域。

视景仿真是虚拟现实（virtual reality，VR）的重要表现形式，使用了很多的虚拟现实技术，因而使得视景仿真主要呈现出如下的主要特征。

1) 多感知性（multi-sensory）：主要是指除了一般计算机技术所具有的视觉

感知之外, 还有听觉感知、力觉感知、触觉感知、运动感知。

2) 沉浸感 (immersion): 又称临场感, 指用户感到作为主角存在于模拟环境中的真实程度。理想的模拟环境应该使用户难以分辨真假, 使用户全身心地投入到计算机创建的三维虚拟环境中。该环境中的一切看上去是真的, 听上去是真的, 动起来是真的, 如同在现实世界中的感觉一样。

3) 交互性 (interactivity): 指用户对模拟环境内物体的可操作程度和从环境得到反馈的自然程度 (包括实时性)。例如, 用户可以用手去直接抓取模拟环境中虚拟的物体, 这时手有握着东西的感觉, 并可以感觉物体的重量, 视野中被抓的物体也能立刻随着手的移动而移动。

4) 构想性 (imagination): 该特征强调了虚拟现实技术应具有广阔的想象空间, 可拓宽人类的认知范围, 不仅可再现真实存在的环境, 也可以任意构想客观不存在甚至是不可能发生的环境。

图 1.1 是视景仿真系统的总体框架。

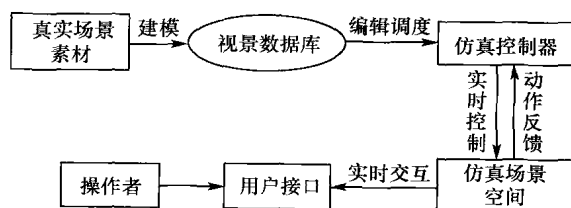


图 1.1 视景仿真系统总体框架

1.1.2 视景仿真技术的发展动态

随着各项技术的发展和计算机图形功能的增强, 国内外越来越多的研究人员将采用视景仿真技术来探索自然的奥妙, 如进行战术仿真模拟、设计并组装虚拟样机等方面的研究。

1. 国外视景仿真技术的发展动态^[1,2]

早在 1983 年, 美国陆军司令部和美国国防部高级项目研究计划局 (Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA) 就开始资助仿真器联网 (simulator networking, SIMNET) 项目的研究计划, 其目标是开发一个主要提供步兵、坦克驾驶员作战模拟训练使用的虚拟陆战战场环境。截至 1989 年, SIMNET 已建成了分布于美国和德国的 11 个基地, 包括 260 个地面车辆仿真器、指挥中心和数据处理设备的综合作战仿真网。SIMNET 的体系结构和协议已发展成了 IEEE 1278 标准的 DIS 协议, 但 DIS 并不能满足大规模仿真的需求。1994 年, 美国 DARPA 和大西洋司令部联合资助了战争综合演练场 (synthetic threat of

war, STOW) 项目, 目标是建立大规模分布式虚拟战场环境, 提供指挥和参谋人员联合作战训练及任务预演使用, 并于 1997 年 10 月举行了 STOW 97 联合演练, 共有 3700 多个参演实体, 8000 多个参演对象, 使用了 $500\text{km} \times 750\text{km}$ 的合成地形环境。在 STOW 项目体系结构和协议基础上, 美国国防部于 1996 年 9 月正式颁布了高层体系结构 (high level architecture, HLA)。在 STOW 的基础上, 美国国防部于 1997 年开始资助支持多兵种联合演练的联合仿真系统 (joint simulation system, JSIMS) 项目, 目的是为各兵种的训练和教学提供包括各种任务、各阶段的逼真联合训练支持, 并于 2002 年运用 JSIMS 进行了“千年挑战 2002”联合军事演习, 被认为是美军历史上规模最大的联合军事演习, 包括 1.5 万个目标、600 个作战平台及 400 种弹药, 可产生约 6 万个仿真实体和 11 万种交互。共有不同军种的 42 个仿真系统, 90 多个盟员集成为一个大规模复杂的分布式虚拟战场环境。

进入 21 世纪以来, 随着高科技的迅猛发展和广泛应用, 促进了军事理论的创新和编制体制的变革, 推动了武器装备的发展和作战方式的演变。在阿富汗战争打响之前, 美国陆军装备司令部出资 10 亿美元构建了逼真的阿富汗虚拟战场, 模拟了从沙漠到丛林以及拥挤的街道等各种地形, 并通过人工智能的方法设计塔利班“士兵”供参战人员模拟使用。这种虚拟的战场环境将参训人员带到了像实际战场一样的、弥漫着危险气氛的环境中, 让训练人员相信自己可以应付眼前的一切; 到这些被训练的人员真正上战场时, 他们就已成了熟悉战场环境的老兵。在对伊拉克开战半年前, 美军就构建了巴格达城区虚拟战场, 将所有的建筑物、街道、公共设施、树木等全部模拟出来, 让参演的士兵如身临其境, 可以判定进攻方向、威胁强度、掩蔽位置, 可以制定作战预案, 进行战斗演练。在美军大规模综合性空战演习的“红旗”年度演习中, 全数字化的三维战场仿真系统场景运用真实空中作战、陆地作战、以及电子化战争环境下的训练场景, 最大限度地再现了战争场景及部队的作战能力, 使之成为全世界最令人震撼、最高水平的综合性虚拟仿真演习系统。彩色图片 1 (见文前彩色图片) 为美军红旗军事演习中的三维场景演示图。

英国近年研制成功的“近战环境”城市战模拟系统是世界上首次成功模拟城区环境的作战模拟系统, 此系统可模拟在 30km^2 的区域内进行连级规模作战对抗的仿真环境, 是视景仿真技术在城区军事行动中的典型实例。

荷兰海牙 TNO 研究所的物理电子实验室 (TNO-PEL) 开发的训练和模拟系统, 通过改进人机界面来改善现有模拟系统, 以使用户完全介入模拟环境。

德国在视景仿真的应用方面取得了出乎意料成果。在改造传统产业方面, 一是用于产品设计、降低成本, 避免新产品开发的风险; 二是产品演示, 吸引客户争取订单; 三是用于培训, 在新生产设备投入使用前用虚拟工厂来提高工人的

操作水平。

2. 国内视景仿真技术的发展动态

和一些发达国家相比,我国视景仿真技术还有一定的差距,但已引起政府有关部门和科学家们的高度重视。根据我国的国情,制订了开展视景仿真技术研究的计划。例如,“十五”及“十一五”规划、国家自然科学基金委、国家高科技研究发展计划等都把 VR 技术列入在研究项目计划之内。在紧跟国际新技术的同时,国内一些重点院校、科研院所和部队研究单位已积极投入到这一领域的研究工作中^[3,4]。

北京航空航天大学计算机系也是国内最早进行 VR 研究、最有权威的单位之一,其虚拟实现与可视化新技术研究室集成了分布式虚拟环境,可以提供实时三维动态数据库、虚拟现实演示环境、用于飞行员训练的虚拟现实系统、虚拟现实应用系统的开发平台等,并在以下方面取得进展:着重研究了虚拟环境中物体物理特性的表示与处理;在虚拟现实中的视觉接口方面开发出部分硬件,并提出有关算法及实现方法。

清华大学国家光盘工程研究中心所作的“布达拉宫”,采用了 QuickTime 技术,实现大全景 VR 制。

浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室开发了一套桌面型虚拟建筑环境实时漫游系统,该系统采用了层面叠加的绘制和预消隐技术,实现了立体视觉,同时还提供了方便的交互工具,使整个系统的实时性和画面的真实感都达到了较高的水平。另外,他们还研制出了在虚拟环境中一种新的快速漫游算法和一种递进网格的快速生成算法。

哈尔滨工业大学计算机系已经成功地合成了人的高级行为中的特定人脸图像,解决了表情的合成和唇动合成技术问题,并正在研究人说话时手势和头势的动作、语音和语调的同步等。

北方工业大学 CAD 研究中心是我国最早开展计算机动画研究的单位之一,关于 VR 的研究已经完成了两个“863”项目,完成了体现动画的自动生成部分算法与合成软件处理。

另外,西北工业大学 CAD/CAM 研究中心、上海交通大学图像处理模式识别研究所,长沙国防科技大学、江苏科技大学、安徽大学等单位也进行了一些研究性工作和尝试。

1.1.3 视景仿真技术的应用

视景仿真技术应用非常广泛,目前已在军事演练、教育训练、设计规划、产品建模、大型工程漫游、心理学治疗及艺术与娱乐等多方面取得了很多成功案例。

1. 军事领域

视景仿真技术的产生源于军事仿真需求,其目的是为综合军用仿真系统提供大规模分布式的虚拟战场环境,并借助这一仿真的综合作战环境来完成对作战人员的训练,对武器装备的效能评估,以及对作战方案的验证和演练。发达国家十分重视作战建模与仿真(M&S)的超前智能较量,并将其作为国防建设和军事改革重大决策过程中必不可少的环节。美国已将发展“合成仿真环境”作为国防科技发展的七大科技推动领域之一,其基础技术之一就是视景仿真,模拟和仿真技术已被列为关键技术之一,如美国国防部的先进研究计划署(ARRPA)配备的仿真网络(simnet),即近战战术训练器(CCTR),就是战场虚拟现实仿真应用中的一种,它将分布在世界各地的200多个模拟舱连接在一个实时的虚拟环境中进行合成训练。目前,已经连接了50多个地区的1000多个仿真器,并计划把其他盟国的兵力仿真系统聚合在一起,提供诸军兵种联合的综合虚拟战场。英国近年研制成功的“近战环境”城市战模拟系统是世上首次成功模拟城区环境的作战模拟系统,此系统可模拟在30km²的区域内进行连级规模作战对抗的仿真环境,是视景仿真技术在城区军事行动中的典型实例。

2. 医学领域

视景仿真技术在医学领域可以用于教学及复杂手术的规划,并且可以提供操作和对手术结果进行预测,进行人体解剖仿真、外科手术仿真等,以及利用虚拟的医疗手术治疗系统对患者进行远程救治。

2003年,我国第一军医大学宣布完成了首例女虚拟人的数据采集。首都医科大学对虚拟中国女性数据集的高分辨率可视化和上海交通大学对虚拟人体运动建模的研究各有特色。

1985年美国国立医学图书馆(NLM)就开始人体解剖图像数字化研究和利用,目前已经有虚拟人体模型可供下载。视景仿真技术可以遥感外科手术,在偏远的山区,通过远程的医疗虚拟现实系统,医生只需要对虚拟病人模型进行手术,通过网络将医生动作传送到另一端的手术机器人,由机器人对病人实施远程手术。手术实时进展的情况也可以通过机器人摄像机实时传给医生的头盔立体显示器,以便医生实时掌握手术情况。

3. 教育领域

视景仿真技术应用于教育是教育发展的一个飞跃。它使传统的“以教促学”的学习方式被取而代之为学习者通过自身与信息环境的相互作用来得到知识。

国内利用视景仿真技术开发了多媒体教学软件。例如,邹湘军、周荣安等人