

实时三维图形技术

赵沁平 郝爱民 王莉莉 著



科学出版社

实时三维图形技术

赵沁平 郝爱民 王莉莉 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

实时三维图形技术是一项充满活力和挑战的前沿技术,可广泛应用于影视与游戏、工业设计与制造、文化保护与教育培训、军事、公共安全与医疗手术训练、城市规划与管理等众多行业领域。本书系统总结和梳理了作者在实时三维图形领域多年的研究工作和研究成果,重点介绍了三维图形加速绘制技术和实时逼真绘制技术。为了知识的完整性,书中加入了三维建模技术和有关的三维图形技术基础,同时还介绍了天绘图形平台及其应用示例。书中大多数方法和算法是由作者研究团队提出或改进的,并在天绘图形平台中得到应用,收到了良好效果。

本书可供虚拟现实、先进仿真和游戏制作等技术研究 and 应用开发人员阅读,亦可作为高等院校计算机、自动控制、仿真、电子等有关专业高年级本科生和研究生的教学参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

实时三维图形技术/赵沁平,郝爱民,王莉莉著. —北京:科学出版社,2012
ISBN 978-7-03-035719-9

I. 实… II. ①赵… ②郝… ③王… III. 三维-计算机图形学
IV. TP391.41

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 236752 号

责任编辑:林 鹏 魏英杰 杨向萍 / 责任校对:朱光兰

责任印制:张 倩 / 封面设计:陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 10 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2012 年 10 月第一次印刷 印张:15 1/4

字数:294 000

定价:135.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈科印〉)

前 言

真实感三维图形技术是创新人机界面、改善人机环境、达成人机和谐的支撑技术,实时三维图形平台以实时真实感三维图形技术为核心,面向应用系统开发人员,提供易用、高效、可扩展的图形开发环境,是开发虚拟现实、计算可视化、动漫游戏等计算机涉图应用系统必不可少的基础软件。随着计算机图形应用的日益普及,图形功能已经成为计算机系统的基本组成部分,实时三维图形平台也已成为继操作系统、数据库之后又一大型通用基础软件系统。

长期以来国内没有可与国外图形平台相抗衡的软件系统,国内单位,包括军队部门一直使用国外产品,存在巨大安全隐患,而且其底层封装以及技术壁垒使我们难以进行图形技术的深层开发和优化,自主创新受限,同时国外商业图形软件价格还十分昂贵。因此,研制具有自主知识产权的实时三维图形平台就成为国家的重大需求。

鉴于上述原因,从 2000 年起在国家 863、973 等科技计划,以及北京航空航天大学 211 工程和 985 工程的支持下,我们研制开发了具有自主知识产权的天绘实时三维图形平台(原名 BH_GRAPH)。天绘图形平台的成功开发使我国图形支撑技术取得重大进步,拥有了图形平台的自主知识产权,可以满足相关行业、单位对实时三维图形平台不断增长的应用需求。

实时真实感三维图形技术是一项充满活力和挑战的前沿技术,存在许多尚未解决的理论和方法问题。实时三维图形平台是基于实时真实感三维图形技术的大型复杂软件系统,不仅开发工作量大,而且需要随着图形技术的发展而不断更新。我们在图形真实感和实时绘制技术方面进行了持续研究,取得一批创新成果和技术突破,并在此基础上研制开发了天绘实时三维图形平台。

本书是对天绘图形平台创新研究成果的系统总结和梳理,以三维图形的“加速绘制”和“逼真绘制”为重点,详细介绍了可见性剔除技术、多分辨率绘制技术、混合绘制技术、移动终端上的图形绘制技术和 GPU 并行计算技术等多种三维图形加速绘制技术,以及光照计算技术、阴影绘制技术、不定形对象表现技术和几何对象变形技术等多种逼真绘制技术。此外,为了知识的完整性,本书加入了三维建模技术和有关的三维图形技术基础,同时还介绍了天绘图形平台及其应用示例。书中大多数方法和算法是由我们研究团队提出或改进的,并在天绘图形平台得到应用,收到了良好效果。

本书能够顺利出版,需要感谢李帅、梁晓辉、齐越、何兵、沈旭昆、吴威、周忠、吴伟和、姜涵等老师富有创造性的工作,以及马志强、吴伟和、刘星龙、杨丽鹏、沈哲、赵永涛、高玉建、王青正等同学的艰苦付出。此外,还要感谢科学出版社领导和编辑的大力支持。

实时三维图形技术有巨大的发展潜力和广阔的应用前景,同时也存在大量有待解决的技术问题。希望越来越多的计算机科学工作者加入三维图形研究开发队伍,为我国在这一重要的科学技术领域达到国际领先水平做出贡献。

作 者

2012 年 7 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 实时三维图形技术概述	1
1.1.1 三维建模技术	1
1.1.2 三维图形实时绘制技术	12
1.1.3 实时三维图形技术主要应用	15
1.2 实时三维图形技术基础	18
1.2.1 数学基础	18
1.2.2 三维图形的构成要素	19
1.2.3 实时三维图形绘制管线	21
1.3 实时三维图形技术主要研究内容	23
1.3.1 几何建模表示	23
1.3.2 真实感三维图形绘制技术	25
1.3.3 加速绘制技术	29
1.4 实时三维图形技术发展趋势	33
1.4.1 三维建模技术发展趋势	33
1.4.2 实时三维图形逼真绘制技术发展趋势	36
参考文献	37
第 2 章 三维图形加速绘制技术	43
2.1 可见性剔除技术	43
2.1.1 视锥体剔除	43
2.1.2 遮挡剔除	45
2.2 多分辨率绘制技术	52
2.2.1 三维模型化简与视相关的递进网格绘制	52
2.2.2 运用矩阵结构的可并行地形细节层次绘制技术	58
2.3 混合绘制加速方法	62
2.3.1 图像代理算法	62
2.3.2 点面混合绘制方法	65
2.4 移动终端上的三维图形加速绘制技术	73
2.4.1 远程绘制与本地绘制	74

2.4.2 移动终端上的点绘制技术	75
2.4.3 保留细节特征的轮廓线远程绘制算法	78
2.5 绘制算法中的 GPU 并行计算技术	82
2.5.1 基于 GPU 的粒子系统	83
2.5.2 基于 GPU 的标量场驱动物理变形算法	85
参考文献	89
第 3 章 实时逼真绘制技术	93
3.1 光照计算技术	93
3.1.1 图像空间的近似二次折射绘制方法	94
3.1.2 图像空间的近似焦散绘制方法	99
3.1.3 次表面散射绘制方法	105
3.1.4 微结构全局光照绘制方法	114
3.2 阴影绘制方法	123
3.2.1 阴影映射绘制方法	125
3.2.2 视点驱动的自适应阴影图绘制方法	128
3.2.3 软阴影绘制方法	131
3.3 不定形对象模拟技术	136
3.3.1 水波的模拟	136
3.3.2 云的模拟技术	143
3.3.3 烟尘的模拟	153
3.4 几何对象变形技术	155
3.4.1 柔性织物变形技术	156
3.4.2 刚性物体毁损模拟	163
参考文献	171
第 4 章 天绘实时三维图形平台	177
4.1 天绘的研制概况	177
4.1.1 研制动因	177
4.1.2 研制目标	179
4.1.3 组织实施	180
4.2 天绘的系统组成	180
4.2.1 软件体系结构	180
4.2.2 三维图形绘制引擎	181
4.2.3 三维对象建模工具	189
4.2.4 三维布景工具	191
4.3 比较与特点	193
4.3.1 与国外同类产品的比较	193

4.3.2 天绘的特点	195
第5章 天绘应用示例	196
5.1 天绘开发过程	196
5.1.1 工具与环境设置	196
5.1.2 组件插件的部件组成	198
5.1.3 行为控制插件的部件组成	200
5.2 天绘应用开发实例——军事指挥对抗游戏	200
5.2.1 军事游戏简介	200
5.2.2 军事指挥对抗游戏	202
5.2.3 军事游戏中的虚拟环境构建	202
5.2.4 军事指挥对抗游戏中的虚拟实体生成	213
5.2.5 军事指挥对抗游戏仿真逻辑	219
5.2.6 指挥对抗游戏的部署和操作实例	225
后记	231

第 1 章 绪 论

1.1 实时三维图形技术概述

随着计算机技术的快速发展,计算机应用领域先后出现了一些引人瞩目的重大技术变化,如数据处理和科学计算的可视化、人机交互界面的形象化,以及各行业图形处理的计算机化等。这些重大技术进步的共同基础就是计算机图形技术。

计算机图形技术,特别是实时三维图形技术可以以计算机技术为核心,构建与一定范围真实世界在视、听、触感等方面高度近似的数字化环境。用户可以借助必要的装备与数字化环境中的对象进行交互作用,相互影响,从而产生亲临相应真实环境的感受和体验^[1,2]。这为许多行业的重大问题提供了新的解决途径,如虚拟战场环境中的多军兵种合同作战训练,大型装备制造的虚拟样机与评价,虚拟手术与手术训练,三维数字城市综合规划,三维影视动漫游戏等。这使得各应用领域对实时三维图形技术及其软件的需求大幅度提升。技术上的发展推动和社会需求拉动使得计算机图形功能成为现代计算机系统的重要组成部分,实时三维图形平台也成为继操作系统和数据库之后的又一大型通用基础软件系统。

1.1.1 三维建模技术

要在计算机数字空间中逼真地模拟表现真实世界中的对象,就需要将现实世界中的对象形态、对象之间的相互作用及发展变化所遵循的规律映射为数字空间中的各种数据表示,这一过程称为建模。三维图形技术的目标是在计算机显示终端逼真地呈现真实世界或构想世界的三维对象,这与三维对象的建模技术密切相关。为了知识内容的完整性,下面首先概要介绍三维建模技术,主要包括几何建模、物理建模和虚拟人运动建模等。

1 几何建模技术

几何模型用于表现三维对象的空间结构和外观,建立三维对象的几何模型是对其进行后续图形应用的基础和前提。由于现实世界对象的多样性和复杂性,因此其几何模型也种类繁多。根据模型数据的来源和类型,几何建模方法可

以大体划分为如下三类:

(1) 手工造型

通过人工测量手段获取物体的几何参数,并借助于计算机建模软件构造出对象的三维模型。比较常用的造型软件有 3d max、MultiGen Creator、Solidworks、AutoCAD、Pro/Engineer、Catia、Unigraphics、SolidEdge 等,这些软件在工业设计领域发挥着重要作用。

(2) 摄像测绘

通过拍照、录像等方式获得现实世界对象物体或对象环境的一组图像,对这些图像进行适当的组合和处理来生成对象的模型。这类方法的绘制精细程度只与图像的分辨率有关,摆脱了虚拟场景复杂度对图形绘制能力的限制。但是由于二维图像在生成过程中不可避免地会丧失部分几何信息,因此该方法也具有一定的局限性。

(3) 三维扫描

基于三维扫描仪及其配套的点云处理软件,对三维对象进行半自动化的几何建模。随着高精度三维扫描仪和三维照相机等数据采集设备的快速发展,基于三维扫描仪的建模方法已成为近几年的一个研究热点。

三维扫描技术起源于 20 世纪 80 年代,Cyberware 公司首先研制出了世界上最早的三维扫描仪,并成功地将其投入使用。进入 90 年代,三维扫描技术得到广泛应用,目前已有数百种型号的三维扫描装置。根据扫描仪的工作原理,可将其分为三维电磁波扫描仪、三维超声波扫描仪和三维光学扫描仪等。根据扫描结果有无色彩信息,又可将其分为三维单色扫描仪和三维彩色扫描仪。目前精确度高、方便快捷,广泛使用的是非接触式激光三维扫描仪。

激光扫描能够快速精确地获取物体表面的位置坐标、法向量、颜色以及材质等信息,通过对采集的分片数据进行配准、拼接、修复和纹理映射等处理,可以构造出高精度的三维模型。这方面有影响的代表性工作是斯坦福大学的数字米开朗基罗项目(Digital Michelangelo Project)^[3]。该项目通过一套三维扫描设备和三维重建软件系统完成了对一些大型雕塑的数字化,生成了包含高达 20 亿个多边形和 7000 多幅彩色纹理图像的三维模型。此外,Levoy 等还在意大利进行了 10 座雕像的数据采集,开展了复杂的模型重建工作。北京航空航天大学虚拟现实技术与系统国家重点实验室在中国大学数字博物馆、虚拟奥运博物馆项目中也使用激光扫描仪获取文物的原始三维数据,为兵马俑、日月观音等构造了高精度三维彩色模型。

近年来,城市建模对大区域高分辨率三维数据自动获取的需求不断增加,基于车载激光器的三维扫描技术发展迅速。许多研究者围绕这一主题对较大规模

三维真实场景的自动几何建模进行了大量研究。例如,为了使人们能够通过手机对城市进行具有照片级真实感的三维漫游,文献[4]基于车载激光扫描仪获取的原始点云数据,通过设计噪声滤波、地面和建筑的采样点分类、平面检测、关键点提取等一系列算法实现了对城市街区的快速几何建模。为了构建大规模建筑结构三维几何模型,文献[5]通过设计一个由多个机器人构成的多视角深度图像协作采集系统,实现了不同视角图像的智能化定标,从而可以在无需对所采集的深度图像进行任何后处理的前提下,实现对建筑物的快速自动建模。文献[6]则在激光三维扫描数据的基础上,将墙壁、屋顶等建筑物的局部结构作为特征,通过引入位置、大小、朝向以及拓扑等方面的先验知识,首先自动地从三维点云数据中检测这些特征,然后借助检测的特征和先验知识,完成局部不可见结构的修补,并通过拟合的方式构建每个特征的几何结构,实现了复杂建筑物的三维几何建模。

2 物理建模技术

虚拟环境和对象的逼真性与几何外观建模水平有关,更与其运动、相互作用和发生变化时符合物理规律的程度密切相关,这有赖基于物理规律的建模。

在1987年的SIGGRAPH会议上,Barzel和Barr在题为“Topic in Physically Based Modeling”的报告中提出了基于物理的建模概念。此后,在计算机图形研究领域引入了越来越多的物理学方法,所建立的物理模型也越来越精确、越来越复杂,应用的范围也越来越广泛。

根据建模对象的不同,基于物理的建模方法包括针对刚体、柔性物体、不定形物和人体运动的建模,涉及刚体动力学、连续介质力学、流体力学、弹塑性力学和接触力学等诸多物理学内容。目前,就计算机图形学研究领域而言,采用的物理模型主要有质点弹簧模型(mass-spring model)、有限元法(finite element method, FEM)、边界元法(boundary element method, BEM)和无网格方法(meshless method)等。这些方法的分类和关系如图1-1所示^[7]。一般来说,拉格朗日方法以质点作为观察对象,研究给定质点上各物理量随时间的变化,以及这些物理量从一个质点到另一个质点的变化。欧拉法则是在固定的空间点上研究各物理量随时间的变化,以及这些物理量从一个空间点到另一个空间点的变化。拉格朗日有网格模型可对具有固定形状的物体进行形变建模。拉格朗日无网格模型不需要模型节点之间的连接信息,适用于对拓扑结构多变的物体进行形变建模。欧拉和半拉格朗日模型则主要用于对气体和液体进行模拟。

下面简要介绍几种典型的物理模型。

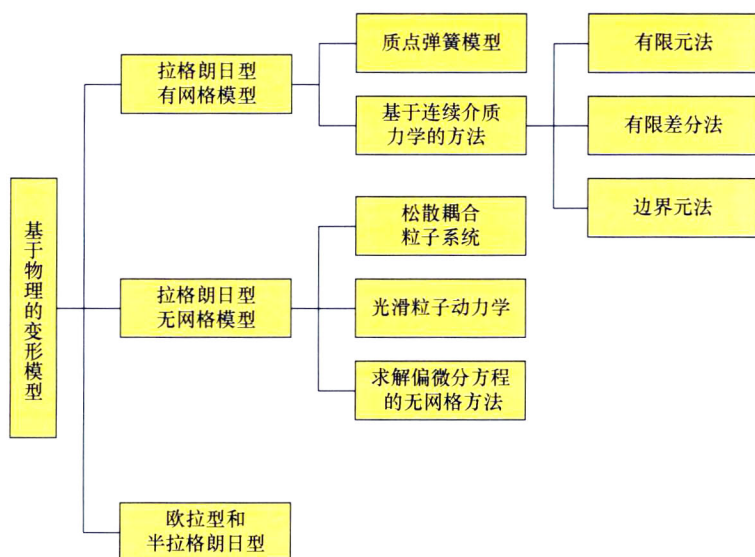


图 1-1 物理仿真模型的分类和关系

1) 质点弹簧模型

质点弹簧模型类似于模拟火焰、雨、雪等自然现象时所采用的粒子系统，是一类被广泛应用的离散质点模型。所不同的是，在传统的粒子系统中，各个粒子间的运动相对独立，相互之间没有牵制，而在质点弹簧模型中，质点和质点之间具有某种弹性联系，通常这种弹性联系可以用无质量的弹簧来表示。在该模型中，所有质点都均匀分布在空间网格上，模型中的每条边都对应一条“结构型”或“切变”弹簧，它们将模型中的所有质点连接起来形成模型的基本形态，并且限制模型在弹簧径向上的形变。

质点弹簧模型的构建直观、易于实现，求解效率高，是最早应用于计算机图形学中的实时变形模型之一。质点弹簧模型的缺点是大部分不收敛，即随着模型网格的不断细化，对模型求解得到的结果不能收敛到问题的精确解。若质点弹簧模型中采用线性弹簧，则只能模拟幅度较小的变形，在模拟大变形时会产生严重失真。此外，在实际操作时对模型中弹簧劲度系数的选择，也很难制定一个量化标准。因此，研究者提出了一些用于提高质点弹簧模型精确性和确定弹簧参数的方法。例如，Etmuss 等^[7]从连续力学公式导出布料模拟的质点弹簧模型，保证了模型的收敛性，并给出了基于材料的属性参数值（杨氏模量和泊松比）来确定弹簧参数的方法；Bianchi 等^[8]采用遗传算法确定弹簧参数和模型网格的拓扑结构，可以得到更为精确的结果。此外，Selle 等^[9]建立了一个可用于头发仿真的质点弹簧模型，该模型可同时对 10 万根头发进行仿真，并模拟计算单根

头发间的摩擦力和引力等交互作用。

2) 有限元法

有限元法以连续介质力学为理论基础,其基本求解过程为:首先将求解区域划分为有限个基本单元的集合体,单元与单元的连接点称为节点;其次选择位移模式,将单元内任意点的位移表示为以单元节点位移为自变量的函数;然后利用变分原理对每个单元建立方程,并将所有单元集合起来,形成整体方程,得到一组以节点位移为未知量的线性方程组;最后求解线性方程组,得到各节点的位移值。

有限元法物理真实感强,但计算代价较大,一般条件下难以满足实时交互响应的需要。例如,文献[10]使用有限元法模拟了弹塑性物体的脆性断裂和韧性断裂效果,该方法采用二次格林应变张量,并引入应变率张量(strain rate tensor)计算阻尼力,取得了令人满意的视觉效果,然而在专用的图形工作站上计算一帧需数十分钟。因此,为实现快速模拟物体变形这一目标,研究者进行了大量探索,这些工作可大致分为以下三类:

(1) 简化运动规律,提高运算速度和稳定性

当弹性物体发生小变形时,可忽略几何方程中的二阶偏导项,采用线性柯西应变张量来度量应变和位移之间的关系,此时变形问题被转化为线性模型,简化了模拟过程,提高了速度。例如,文献[11]将线性弹性模型应用于外科手术模拟,构造了基于四面体单元的线性有限元模型,并分别利用凝聚技术和矩阵选择性相乘的方法来优化计算,实现了软组织的实时变形。Müller 等^[12,13]在变形过程中借助于小变形追加局部旋转补偿的方法来求解大变形问题。Taylor^[14]等完全基于拉格朗日动力学框架,分解出可被预计算的形状函数的空间导数,并通过简单地计算增量应变来避免显式的总体刚度组装和偏微分方程组的数值求解,实现了柔性物体非线性形变的实时仿真。Dick^[15]对物体进行规则六面体网格剖分,从逻辑组织上实现了对可变形物体外观几何模型数据及规则物理仿真网格数据的有机统一,并基于与 Müller 类似的思想在 CUDA(compute unified device architecture)上实现了柔性物体大尺度形变的实时仿真。此外,文献[16]采用基于 GPU 的线性有限元,通过区分手术区与非手术区,实现了实时软组织交互切割与形变模拟,但由于线性有限元的局限,只能处理形变尺度较小的情况。Seiler^[17]在采用八叉树进行自适应网格单元划分的基础上,通过分离用于物理计算的有限元网格和用于绘制的几何网格,实现了交互式的切割仿真,并显著提升了绘制效果。文献[18]则将物体原始网格模型拆分成基网格和细节编码两部分,利用物理方法对基网格进行变形操作,然后通过变形后的基网格和细节编码重构出变形后的精细网格,实现了复杂物体弹性变形的实时模拟。

(2) 降低运算维数,提高运算速度

模态分析法(modal analysis)是一类常用的降维方法,利用类似频域分析的思路,对平衡方程进行解耦操作,使其成为一组以模态坐标及模态参数描述的独立方程,以便求出系统的模态坐标乃至节点位移。James 等^[19]将模态分析法与 GPU 结合起来,通过预计算构建动态响应纹理(dynamic response texture, DyRT)来存储模态矩阵,变形过程中利用顶点处理器将物体的模态坐标进行累加得到顶点的新位移,从而将以往在 CPU 上进行的计算转移到 GPU 上。Hauser^[20]提出了一个模态框架,使得物体操纵、碰撞响应等操作在模态空间中更容易实现。文献[21]则给出了另一种降低运算维数的解决方案,他们把变化的刚度矩阵用四次多项式逼近,并通过自动补充少量的基函数来扩大变形子空间。此外,文献[22]通过对基本模态分析法进行扩展,给出了一种弹塑性物体变形算法,可进行非线性变形的实时模拟。该算法采用求解小变形并追加旋转预测补偿的方式解决几何大变形问题,取得了较好的视觉效果,并完全基于 GPU 实现了顶点位置的更新,提高了处理速度,使之更适于实时应用。

(3) 通过骨架驱动整体变形,合理简化运算过程

骨架驱动的对象变形模拟在计算机动画,特别是角色动画中占有重要地位。对于骨架驱动的一般弹性物体大变形问题,Capell 等^[23]提出采用拉格朗日方程,将非线性力学模型简化为线性力学模型,并对骨架的关节连接处应用网格蒙皮方法进行旋转量值混合,取得了较好的视觉效果。文献[24]也给出了一种骨架驱动弹性物体快速变形算法,通过构造和求解扩散微分方程,从骨架采样点旋转得到单元的旋转特征向量,进而得出旋转四元数经验预测公式来直接构造计算域内的单元旋转场。该方法避免了繁琐的变形步骤划分,提高了计算速度,允许使用更大的求解时间步长,增加了变形系统的稳定性。通过对虚拟人骨架关节传统命名方式的分析,针对其取值不唯一的问题,文献[25]提出了以四元组定义的关节语义,对某关节,其四元组语义各分量的值可根据定义计算出来,而对不同的关节,计算出的值也是不同的,并且四元组语义不随人体姿态的改变而改变,因此可根据关节的四元组语义来区分骨架结构中的关节。此外,文献[26]提出了一种自动提取人体任意姿态网格模型骨架结构的方法。该方法首先利用模型各顶点间测地距离的几何关系自动识别人体位于四肢和头颈末端的 5 个特征点,再以特征点为起点生成等测地距离曲线族,利用等测地距离曲线将人体四肢和躯干区分开来,将这些相邻等测地线中心连接起来生成 5 条骨骼中心线,最后在中心线上根据中心夹角极小值及等测地距离曲线似圆率来确定人体关节的确切位置,可全自动地实现关节点定位和骨骼提取。

3) 边界元法

边界元法与有限元法类似,但它仅把物体的表面划分成单元网格,通过计算每一单元网格上节点的位移插值出每一点的位移。边界元法具有更加适合图形显示应用的特点。首先,边界元法只需要物体模型表面的几何信息,可直接利用物体表面的几何网格模型作为计算单元,相对于质点弹簧模型和有限元法,不需要将物体内部划分为单元网格。其次,边界元法只计算物体表面元素的变形位移和表面受力,无需计算内部结点的未知量,相对于有限元法,减少了计算量,计算速度快。James 等^[27]已将其用于基于触觉反馈的虚拟现实系统中。

边界元法只考虑边界的本质也导致其存在一些问题。例如,所模拟的物体材料必须是质地均匀的,并且难以处理模型拓扑结构变化的情况。文献[28]在将体积分变换为面积分时使用了多精度格林公式,使其可以较好地模拟大尺度模型的变形过程。文献[29]给出了基于 LOD 的动态自适应分辨率网格边界元模型和近似的非线性边界元的物理模型,分别用于减少计算量和模拟物体大变形,取得了较好的效果。文献[30]基于边界元方法给出了一种解决三维无阻力热弹性接触问题的新途径。文献[31]则提出了一种新的边界元方法,用于分析带液泡的二维物体的材质属性。边界元在流体动力学、断裂力学等方面的应用及相关程序实现方法的详细介绍,请读者参考文献[32]。

4) 无网格法

无网格法是一种新的数值计算方法,可以彻底或部分消除网格,因此在处理大变形或拓扑结构改变问题时可以抛开网格重构,不仅可以保证计算精度,而且显著减小了计算的难度,近年来已成为物理建模领域的研究热点。根据形成插值函数方法的异同,无网格法可分为平滑粒子动力学法(smoothed particle hydrodynamics, SPH)、移动最小二乘法 and 单位分解法等。

光滑粒子流体动力学法经过多年的发展,已成功地运用到弹性断裂、流体模拟等多个领域。该方法的基本思想是将连续的流体(或固体)离散为一系列质点,每个质点各自携带质量、速度等物理属性,通过求解质点的动力学方程并跟踪每个质点的运动轨迹,来求得整个系统的力学行为。德国弗莱堡大学图形学实验室提出的流体并行计算模型^[33]已经能够实现 5 万量级物理粒子的实时仿真任务(>16.5 帧/秒),但它只解决了流体方程本身的数值求解问题,未考虑到可变形体与流体耦合情况下的并行计算问题。文献[34]通过光滑粒子流体动力学法模拟流体自由表面,并同时考虑了表面张力的作用。为了处理变形固体与流体的耦合作用,文献[35]根据高斯积分在固体表面分布若干边界粒子,其中流体采用光滑粒子流体动力学法表述,固体则采用有限元法求解。文献[36]使用光滑粒子流体动力学法进行软组织形变和切割仿真,并实现了无网格方法的碰

撞检测与力反馈。Allard^[37]将无网格方法与隐式有限元方法相结合,实现了流-固交互响应的仿真。文献[38]则将无网格方法中的核函数插值思想与有限元方法相结合,针对直接用三维医学图像表示的人体器官,实现了人体器官大尺度形变和切割的实时仿真。

其他关于可变形体物理建模与模拟的无网格方法的详细介绍,请读者参考文献[39]。总的来说,无网格法具有无需网格信息、计算精度高等优点,但是该方法一般没有解析表达式,所需计算量大,甚至超过传统的有限元法,并且对于边界的处理也比较困难。

3 人体动作建模技术

人体作为一种特殊的三维对象,具有复杂的动作行为,需要专门建立特定的运动模型来对其进行模拟。虚拟人动作建模的对象包括手臂、腿部或者全身等大尺度的人体运动,也包括以人脸、唇、手势等为对象的小尺度局部人体动作。下面重点介绍三维人体运动建模和人脸三维表情建模。

1) 三维人体运动建模

三维人体运动建模一般需运用某种手段跟踪人体运动,捕获人体运动的各种数据和参数,然后通过相关分析建立人体的运动模型。三维人体运动数据可通过多种手段和方法获得,目前常用的有基于关键帧、基于物理模型和基于运动数据捕获的方法。

基于关键帧的方法是最简单直观的运动生成方法。其基本思想是人工指定运动序列中某些关键的人体姿态(关键帧),再运用一些常见的插值方法(如二次样条插值)计算中间帧的姿态,最后得到一个运动序列。基于关键帧方法的优点在于给动画设计人员最大的自由度,可以生成各类不同的动作,而不必局限于视觉真实或物理上的合理性。但关键帧方法的人工和时间开销很大,对于真实感人体运动,更需要耗费熟练动画师的大量时间才能完成。

现实中,人体的运动必然遵从某些物理规律,因此基于物理模型的运动生成方法就成为一种很自然的选择。Hodgins 等^[10]基于有限状态机和比例微分控制器提出了一种关节控制器方法,并用于生成跑步、骑车、跳跃等多种运动。类似的方法也被应用到 Wooten^[11]和 Faloutsos^[12]等的工作中,生成了诸如体操、摔跤等动作。基于物理模型的方法可以依据物理定律自动生成人体运动,省去许多人工干预。对于高度动态运动,如立定跳远等,物理定律能给出很强的约束,可以生成真实感较强的运动效果。

运动数据捕获起源于 20 世纪 70 年代,是产生高质量运动数据的主要方法,可以为基于运动捕获的各种研究提供丰富的运动样本。下面对该方法作较详细

的介绍。

(1) 传统的运动数据捕获方式

传统的运动捕获通常需要将特殊的辅助标签(mark)贴在运动实验人员的肢体关节部位,然后利用专用的数据采集装置采集这些随人体运动的辅助标签的位置和方向,从而获得运动数据。数据采集装置根据其原理,可以分为机械、电磁和光学三大类。机械式装置由测量人体关节点位置和方向的电位计组成。电磁式装置是目前比较流行的运动数据捕获方式,采用能测量电磁场的传感器来捕获运动关节点的位置和旋转角度数据。光学装置使用特殊的摄像机拍摄具有高对比度的贴有辅助标签的运动主体的视频,然后从视频中提取运动主体的运动数据。

(2) 基于视频的运动数据捕获

Weinland^[43]和 Ronald^[44]分别从动作的表示、分割和识别等角度对基于视觉的人体运动分析进行了很好的综述。

目前,基于视频的运动数据捕获分为基于单目视频和基于多目视频两种。基于单目视频的人体运动数据捕获方法首先要从单个摄像机获取的图像序列的图像帧中提取人体的不同特征(点、区域、轮廓等),并进行跟踪,然后对人体的三维运动进行估计。基于多目视频的人体运动数据捕获有基于跟踪和基于体素两种实现方式。基于跟踪的运动数据捕获一般首先对多相机进行同步,然后对各个相机捕获的视频进行人体跟踪,最后通过多个跟踪结果进行三维重建,从而得到人体三维运动数据。基于体素的方法则需要首先同步和标定相机,并建立一个三维观察区域,使人体模型处在这个观察区域中,然后采用由轮廓线估计形状(shape from silhouette,SFS)、可见外壳(visual hull)等方法,通过三维体素拟合人体模型,从而得到人体三维运动数据。这种方法的一个显著优点是无需标记,人体运动不受过多的限制。

文献[45]针对视角无关的动作识别提出了加权字典向量描述方法和动作图识别模型,将视频中的局部兴趣点特征和全局形状描述有机结合,形成加权字典向量的描述方法。该方法既具有抗噪声强的优点,又可克服兴趣点无法识别静态动作的缺点,可较好地识别单目视频、多目视频和多动作视频。

此外,Theobalt^[46]建立了一个从多个同步视频中获取不带标记的人体三维运动的原型系统,这是一种融合二维特征跟踪和三维重构的算法,可以实现直接从多目相机中获取三维人体运动数据。在该系统中,先通过计算机视觉中的背景剔除方法取得各个视点对应的人体轮廓线,再通过基于图像的方法构造三维人体可见外壳,自动识别和跟踪各视频中头、手、脚的二维位置以确定其对应的三维位置,并通过这些特征点求解三维人体模型和可见外壳之间的最佳拟合,达