

学与技术

Virtual Human
Technology and Application

虚拟人技术及应用

孙守迁 吴 群 吴剑锋 编著



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

智能科学与技术

Xuni Ren Jishu ji Yingyong

虚拟人技术及应用

Virtual Human Technology and Application

孙守迁 吴群 吴剑锋 编著



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

内容简介

本书论述了虚拟人技术的理论及应用,是作者多年来从事虚拟人技术理论及应用教学和研究成果的结晶。全书共分8章,第1章系统介绍了虚拟人相关技术及应用领域,第2~8章分别介绍了参数化虚拟人体建模、角色皮肤变形动画技术、虚拟人运动建模技术、虚拟人体运动合成技术、虚拟人步态模型研究、面向人机工程的虚拟人生物力学模型以及基于智能个体的群体文化活动复原等内容。

本书适用于计算机动画、新媒体艺术、游戏与娱乐、产品设计、人机工程学、非物质文化遗产保护以及体育仿真等应用领域的从业人员,包括研究人员、教师、研究生以及高年级本科生等。

图书在版编目(CIP)数据

虚拟人技术及应用/孙守迁,吴群,吴剑锋编著.

北京:高等教育出版社,2010.7

ISBN 978-7-04-029049-3

I. ①虚… II. ①孙… ②吴… ③吴… III. ①虚拟技术 IV. ①TP391.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 101907 号

策划编辑	刘 英	责任编辑	刘 英	封面设计	张 志
版式设计	余 杨	责任校对	俞声佳	责任印制	毛斯璐

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 北京北苑印刷有限责任公司

开 本 787×1092 1/16
印 张 15.75
字 数 390 000

购书热线 010-58581118
咨询电话 400-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 2010 年 7 月第 1 版
印 次 2010 年 7 月第 1 次印刷
定 价 49.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 29049-00

前 言

随着计算机科学与技术的蓬勃发展,人们越来越关注如何将人体结构数字化,并在虚拟环境中对人类特性进行仿真。为了研究人机工程学的问题,飞机和汽车制造商们于20世纪70年代创建了第一个计算机化的人体模型。该模型是非常简单的关节结构,由最基本的平面、柱面、椭圆面和球面表示,这是设计领域数字人研究的起点。艺术领域数字人研究的第一个成果是1982年前信息国际公司公布的数字人——Juggler,他的外形是完全数字化的,但是没有面部动画,他的身体运动通过旋转观察(rotoscopy)来记录。同时,1991年启动的美国可视人计划也掀起医学及其相关领域对人类特性数字化表示的高潮。

随着虚拟人技术的日益成熟,虚拟人已被广泛应用于工程、虚拟会议、交互、监控、虚拟环境、游戏、训练、教育、产品设计与维护等领域。随着虚拟现实技术的快速发展,在虚拟环境中建立理想、综合的虚拟人,已经逐渐成为人体动画研究中的一个新方向。

在与环境和谐相处的过程中,人们越来越重视人类自身的生命安全与资源的节约。在解决许多重大实际问题时,有许多内容都涉及人类自身的应用研究。使用传统方法解决这些问题,不仅要花费巨额资金,而且可能会出现人员伤亡。随着计算机技术的快速发展,使得人与计算机的深层次交互成为可能。随着计算机图形图像技术的不断成熟,具有浸入性、交互性和多感知性的虚拟现实技术在设计领域的应用极为广泛,而在三维环境下创作的虚拟人作为虚拟环境中的表演主体,能够感知和操作虚拟世界中的各种对象,它可以弥补设计领域在实体表达、场景布置与动作模拟等方面的不足,避免真实实验或操作演练带来的各种危险,打破时间和空间的限制,用虚拟人体真实且艺术的形象,人们可以更恰当地将虚拟现实技术应用于环境设计、建筑设计、航天航空模型设计、娱乐游戏设计、体育仿真器材设计、军事训练等诸多领域,同时还可以广泛应用于人机交互、运动表示、人机工程、数字图书馆等领域。总之,随着虚拟现实技术与计算机图形图像技术的不断发展,虚拟人的深入研究为解决这些问题提供了新方法、新途径。

本书是一本论述虚拟人技术理论及应用的专著,是作者多年来从事虚拟人技术及应用教学和研究成果的结晶。本书既是对作者多年研究工作的总结,也希望为后续相关研究起到抛砖引玉的作用。本书对虚拟人相关技术及相关应用做了全面的阐述,章节内容如下:

1. 概述:对虚拟人概念,应用领域及分类方法,以及各个层次的虚拟人技术进行简单梳理。
2. 参数化虚拟人体建模技术:阐述了参数化虚拟人体建模的基本原理、方法,并介绍了作者以此工作为基础创建的服装仿真系统。
3. 基于骨架驱动的虚拟人皮肤网格变形动画技术:对角色皮肤变形动画技术进行了讨论,着重介绍了骨骼混合算法,通过对骨骼混合进行改进,有效提高了角色骨架关节部位的皮肤网格变形质量。
4. 虚拟人运动建模技术:围绕人体运动建模技术展开论述,探讨了关节运动约束机制及基于逆向运动学的动作操纵技术,在人机动画生成方面,探讨了关键帧下运动捕获数据在不同骨骼结构之间的运动重定向问题。

5. 基于运动编辑的虚拟人体运动合成:概述了运动编辑的一些基本操作,并着重讲述了两个具有实时性的算法:循环坐标下降法和雅可比转置法,以及多层次 B 样条原理和用其进行运动路径编辑的方法。最后介绍了作者提出的一种从运动捕捉数据中提取关键帧的算法,以及运动编辑系统 Eidolon 的设计与实现。

6. 虚拟人步态模型研究:首先对虚拟人步态研究中涉及的一些概念加以阐述,并分析其运动表示方法,步态的运动学模型,然后讨论了步态参数的特性以及控制方法;最后介绍了作者在近年来关于服装展示所做的研究。

7. 面向人机工程的虚拟人生物力学模型:介绍了基于生物力学的虚拟人骨骼及肌肉的几何建模;探讨了动、静态情况下骨及关节的生物力学模型,即外力模型;探讨了动、静态情况下人体表面主要骨骼肌的肌肉力预测模型,即内力模型。

8. 基于智能个体的群体文化活动复原:介绍了虚拟人智能行为决策,虚拟人感知建模,然后阐述了基于自主交互的群体文化活动重建实例。

本书共 8 章,其中第 2 章由王鑫编写,第 3 章由吴剑锋编写,第 4 章由吴群编写,第 6 章由徐江和孙守迁编写,第 8 章由杨程编写,孙守迁负责编写其余各章节及全书的统稿。在成书过程中,柳杨、徐爱国、徐孟、沈军行等参与了部分工作。

本书的研究工作得到了国家 863/CIMS 主题、国家自然科学基金、教育部博士点基金以及浙江省重大科技攻关工业项目长期有力的资助,得到了国家 863/CIMS 主题专家组专家们的长期、具体的指导,在此表示感谢。

希望本书能为游戏动画、虚拟角色创编提供理论上的指导,为数字化艺术与设计领域的新媒体创作提供新的思维方式和方法,为基于人机工程的产品设计及非物质文化遗产保护提供有效的手段,从而拓展虚拟人技术的应用范围,提升国内计算机动画、新媒体艺术、互动媒体设计、影视制作、游戏与娱乐业、产品设计、非物质文化遗产保护以及体育仿真等应用领域的技术水平。

作 者

2010 年元月

目 录

第 1 章 概述	1	3.1.1 顶点动画	38
1.1 引言	1	3.1.2 骨架子空间变形技术	38
1.2 应用领域与分类	1	3.1.3 结合姿态空间的变形 优化	39
1.3 研究内容	3	3.1.4 嵌入辅助关节的骨架 子空间变形	42
1.3.1 虚拟人体建模	3	3.1.5 引入 FFD 中间体的 变形方法	43
1.3.2 虚拟人运动控制技术	5	3.1.6 变换矩阵混合技术	44
1.3.3 虚拟人群仿真	8	3.1.7 骨骼混合算法	45
1.3.4 虚拟感知与情感计算	9	3.2 改进的骨骼混合算法	46
1.4 小结	10	3.2.1 四元数与单位四元数 插值	46
参考文献	11	3.2.2 角色骨架结构与运动 表示	48
第 2 章 参数化虚拟人体建模技术	15	3.2.3 基于旋转四元数球面 线性插值的骨骼混合 算法	49
2.1 空间几何变形技术	15	3.2.4 运行时皮肤网格顶点的 轴心校正	50
2.2 人体测量与特征参数	17	3.3 插值预计算性能优化	51
2.2.1 人体形态测量	17	3.3.1 单位四元数量化索引表 的生成	51
2.2.2 建模特征参数选择	18	3.3.2 构造单位四元数插 值表	52
2.3 模板的选取与参数化	18	3.3.3 单位球剖分与算法 验证	53
2.3.1 测量平面的定义	19	3.3.4 数据结构运算的进一步 优化	54
2.3.2 长度信息的提取	19	3.4 皮肤网格顶点法向量的动态 更新	55
2.3.3 围度信息的提取	20	3.5 实验结果	56
2.4 基本变形建模控制方法	21	参考文献	62
2.4.1 轴变形原理	21		
2.4.2 增加径向控制的扩展 轴变形	21		
2.5 控制体的构造与变形建模	25		
2.5.1 长度变形控制	26		
2.5.2 围度变形控制	27		
2.5.3 变形建模	27		
2.6 变形网格自适应细分	28		
2.7 实验结果	28		
参考文献	34		
第 3 章 基于骨架驱动的虚拟人皮肤 网格变形动画技术	36		
3.1 相关工作	37		

第 4 章 虚拟人运动建模技术	64	5.4.4 实验结果	103
4.1 基于运动学的建模技术	64	5.5 运动编辑系统 Eidolon 的 设计与实现	105
4.2 基于动力学的建模技术	65	5.5.1 Eidolon 的体系结构	106
4.3 基于物理的建模技术	65	5.5.2 类层次与主要数据 结构	106
4.4 面向人机工程仿真的人体 运动建模	66	5.5.3 运动数据文件解析	108
4.4.1 基于逆向运动学的人体 运动控制	67	5.5.4 界面设计	109
4.4.2 基于运动捕获数据的 运动重定向	74	附录 A 四元数及其运算	111
附录 A MATCHINFO 文件说明	79	附录 B Cal3D	113
附录 B HTR 文件说明	79	参考文献	118
参考文献	82	第 6 章 虚拟人步态模型研究	120
第 5 章 基于运动编辑的虚拟人体 运动合成	86	6.1 概述	120
5.1 运动编辑	86	6.1.1 步态研究的概念和 难点	120
5.1.1 运动编辑的概念、必要性 与难点	86	6.1.2 步态研究的技术现状	121
5.1.2 运动编辑技术的研究 现状	87	6.2 步态的运动表示	122
5.2 运动编辑的基本操作	88	6.2.1 步态运动学分析	122
5.2.1 人体运动的表示	88	6.2.2 运动数据表示方法	123
5.2.2 运动连接	89	6.2.3 基于矢状面仰角的 步态数据表示	126
5.2.3 运动混合	90	6.2.4 基于矢状面仰角的 步态周期图谱	126
5.2.4 运动位移映射	90	6.2.5 步态模型的基本思想	128
5.2.5 运动信号处理	91	6.3 步态的运动生成	129
5.2.6 运动重定向	94	6.3.1 运动学模型	129
5.3 运动路径编辑	96	6.3.2 步态数据集	130
5.3.1 运动路径抽象	96	6.3.3 矢状面仰角约束	131
5.3.2 利用多层次 B 样条提取 原始运动路径	96	6.3.4 矢状面仰角到关节角的 映射机制	132
5.3.3 运动路径编辑	99	6.4 步态参数控制	137
5.4 从运动捕捉数据中提取 关键帧	101	6.4.1 步态参数分类	137
5.4.1 四元数之间的距离	102	6.4.2 高层参数与底层参数	138
5.4.2 从运动捕捉数据中提取 关键帧	102	6.4.3 高层控制参数	138
5.4.3 重建动画	103	6.4.4 底层驱动参数	140
		6.5 面向服装展示的虚拟人步态 模型研究	144
		6.5.1 虚拟人的步态模型	

验证模块	144	7.4.3 动性收缩状态下的 肌肉力预测模型	191
6.5.2 系统构建	145	7.4.4 实验验证	196
参考文献	146	7.5 模型验证	202
第7章 面向人机工程的虚拟人生物 力学模型	149	7.5.1 原型系统的设计与 实现	202
7.1 面向人机工程仿真分析的 人体生物力学模型	150	7.5.2 实例分析	207
7.1.1 面向人体测量学应用 的模型	150	附录 A 人体主要骨骼肌拓扑 结构	211
7.1.2 用于碰撞实验的模型	151	附录 B 质量、质心、转动惯量对 体重、身高的二元回归 方程系数表	215
7.1.3 面向人机工程分析评价 的人体生物力学模型	151	附录 C 人体主要骨骼的力学 特性	218
7.2 基于生物力学的人体几何 建模	153	附录 D 肌肉生理横截面面积 (PCSA)	219
7.2.1 人体骨骼模型的层次 结构及几何表示	154	附录 E 上肢及肩部肌肉力预测 模型组成	219
7.2.2 肌肉几何建模	164	参考文献	220
7.2.3 模型应用	169	第8章 基于智能个体的群体文化 活动复原	226
7.3 基于生物力学的虚拟人体 外力模型	175	8.1 概述	226
7.3.1 建立外力模型的先决 条件	175	8.2 智能个体	227
7.3.2 外力模型求解方法	177	8.2.1 智能行为决策	227
7.3.3 结果分析	184	8.2.2 感知建模	228
7.4 基于生物力学的虚拟人体 肌肉力预测模型	187	8.2.3 行为规划与实现	230
7.4.1 基于 Hill 的肌肉三元素 模型	188	8.2.4 随机行为	233
7.4.2 静性收缩状态下的 肌肉力预测模型	189	8.3 基于自主交互的群体文化 活动重建实例	237
		参考文献	241

第 1 章 概 述

1.1 引言

随着人类需求的提高和细化^[1,2], 艺术与设计的研究内容与服务对象正在发生深刻变化, 其内涵与外延也不断得到扩充和发展。但是, 人依然居于主导地位, 人类特性是艺术与设计的核心要素^[3], 尤其在虚拟环境中对人类特性进行仿真。因此, 随着艺术、设计和计算机科学交叉领域的发展, 虚拟人技术成为新的研究热点, 并成为数字化艺术与设计的支撑技术之一。

在虚拟空间中, 对人类特性的仿真可以是多视点的。人类的几何(解剖)、物理、生理等特性, 构成了医学及其相关领域数字人(Digital Human)学科的研究重点。数字人研究的目标是实现人体从分子到细胞、组织、器官系统和整体的精确模拟, 其研究成果可以为艺术与设计领域的虚拟人研究提供准确的人体数据信息、运动信息和生物/生理信息^[4]。

同样着眼于人类特性的数字化再现, 数字媒体领域中虚拟人技术研究的侧重点在于人类的几何、行为、感知、情感和社会特性, 需要满足如下要求^[5-8]:

- (1) 按照人的骨架系统建模, 并且可以结合具体应用进行自由度的增删。
- (2) 具有合理可信的人体尺寸和外观。
- (3) 具有合理可信的姿态、动作和行为特性。
- (4) 可以感知并影响其他虚拟人以及虚拟环境, 其感知可通过听觉、触觉、视觉等多种方式实现。
- (5) 可以实时按照人的行为特性与其他虚拟人或者三维(3D)虚拟环境发生交互, 交互的媒介可以是肢体动作、文本或者自然语言。

1.2 应用领域与分类

根据 N. I. Badler 和 D. Thalmann 等人的总结, 虚拟人技术的主要应用领域如下^[5,6]:

(1) “人-机-境”工程分析、评价与仿真: 包括工作空间评测、碰撞仿真分析等; 在航空、航天、车辆等应用场合, 应用虚拟人技术, 仿真和分析在不同条件下与环境的交互并进行动态测试, 可以大量减少实物仿真的次数, 并有效评估测试设计方案的合理性与设计环境的安全性和舒适性等。

(2) 体育与舞蹈仿真: 通过运动分析、运动理解、运动表示和运动控制等手段以反映体育训练和舞蹈编排的效果, 为进一步工作提供参考。

(3) 游戏与娱乐:将三维虚拟人加入各种游戏和娱乐环境,一直是人们感兴趣的课题。

(4) 计算机辅助教学、虚拟会议或遥现:通过虚拟人技术,可以实现远程指导、交互式辅导和个性指导。

(5) 整形外科手术分析、评价与仿真:利用虚拟病人可以真实地对手术过程进行验证、修改和完善,有效提高手术的成功率。

(6) 建筑与环境仿真:包括虚拟战场、虚拟商场、虚拟会展、虚拟城市、虚拟大学等;虚拟人可以作为真实人在虚拟环境中可视化、分析、训练或体验的替代品。

虚拟人技术研究立足于人类多项特性的数字化表现,是多视点、复杂的开放式课题。我们至少可以从5个维度建立人体多层次的计算机模型,为分析计算和仿真模拟提供基础,每个维度在具体实现时又将涵盖很广的范围。N. I. Badler 用表 1-1 描述了5个维度上的多层次要求^[9]。

表 1-1 虚拟人多层次要求

维度	层次描述
几何维	2D > 3D 骨架 > 3D 多边形 > 3D 曲面 > 自由变形 > 细分曲面 > 肌肉、脂肪模拟 > 生物力学模拟 > 服饰和装备模拟 > 生理特征(排汗、疼痛、损伤)模拟 > ……
功能维 (运动特性)	卡通(微约束) > 基于关节的骨架 > 关节的连接约束 > 骨架受力约束 > 疲劳约束 > 危险约束 > 伤害约束 > 技巧性动作 > 压力和紧张性刺激的影响 > 心理模拟 > 认知模拟 > 角色扮演 > 团队协作 > ……
时间维	离线动画 > 交互操作 > 实时运动反馈 > 参数化运动合成 > 多 Agent > 实时人群仿真 > 协作团队 > ……
自治性 (行为特性)	预制 > 脚本控制 > 交互控制 > 可对事件做出反应 > 可自主决策 > 可交流 > 可预测未来 > 可采取主动 > 可领导他人 > ……
个体性	普适特征 > 给定特征 > 文化差异 > 个性 > 生理/心理特征 > 性别和年龄差异 > 面向特殊个体的特征 > ……

不同的应用需求针对某一维或多维特性进行优化。在这里,一个极富挑战的课题就是:如何生成一个模型,可以提供足够多的参数以适应不同应用需求的全维度、多层次的人体特性数字化要求。

目前,一种普遍认可的虚拟人分类方法是从人的运动和行为特性出发。如 M. Cavazza 等人^[10]在前人研究^[11,12]基础上,综合考虑面部动画与身体运动控制,将虚拟人分为四类:① 化身虚拟人。这种虚拟人是真人的化身,所以必须具有看起来真实的身体和脸,而且对虚拟人的模拟必须与真人的身体和脸相互关联。② 引导虚拟人。虽然受用户的驱动,但他们不直接对应用户的运动,用户使用输入设备更正虚拟人的位置。在这种情况下,面部表情驱动器存储一组定义好的表情和动画,用户交互选择。③ 自主虚拟人。具有一定的自我行动能力。一般地,虚拟人应该感知其环境中的物体或者其他虚拟人,但通常虚拟人只是简单地出现在环境中并与环境进行

交互。④ 交互感知虚拟人。能够自主地识别其他虚拟人和真人,并与其进行通信。在虚拟人之间进行通信时,姿态语言、面部表情和语音的作用是等同的,非语音的通信涉及姿态及其所表示的含义。

1.3 研究内容

虚拟人技术研究涉及计算机图形学、运动学与动力学、人工智能、虚拟现实、数字化艺术与设计等多个学科,由于人体本身的复杂性以及目前计算资源的有限性,研究中存在许多亟待解决的问题。

总的来说,虚拟人技术研究具有多维数、多层次、多尺度、多学科和多目标的特点,它所面向和所表示的是一个极为庞大和复杂的系统。

如图 1-1 所示,在数字技术、艺术与设计的交叉区域形成了四大板块的研究内容:虚拟人体建模、运动控制技术、虚拟人群仿真和虚拟感知与情感计算。其中,虚拟人体建模和运动控制技术的研究主要针对单个虚拟人展开,而具有感知与情感的单体的集合就构成智能虚拟环境中智能社会人的研究内容,这不是简单地混合,而是需要专门的虚拟人群仿真、虚拟感知与情感计算的相关研究作为支持。四大板块的研究内容关注人类的不同特性,下文将分别加以介绍。

1.3.1 虚拟人体建模

虚拟人体建模解决人类几何特性的数字化问题。人体具有复杂而不规则的表面,人体建模的问题就是产生不规则几何形状的问题。虚拟人体建模技术是虚拟人研究的第 1 步工作,如图 1-2 所示,包含了如下两个层次的研究内容:虚拟人几何表示方法和虚拟人体建模方法。

在艺术与设计领域,相对于人脸模型的研究,人体肢体模型的研究占据着主要的位置,因此本文重点探讨虚拟人肢体模型的研究,而对人脸模型仅做简单介绍。

虚拟人几何表示方法,主要研究虚拟人在虚拟环境中的几何表示,其目的是在虚拟空间中创建虚拟人的计算图形模型,解决“是什么(What is)”的问题,属于“本质论”的研究范畴。

早期虚拟人几何表示常采用如下几种方法:棒模型、体模型、表面模型^[13]。棒模型将人体各肢体用棒图形表示,关节用圆点表示;体模型利用基本体素表示人体,包括圆柱体、椭球体、球体以及椭圆环等。这两种方法简单,使用方便,数据量少,时空代价少,但无法表示表面的局部变化,逼真度不够;另外,棒模型很难区分遮挡情况,对扭曲和接触等运动无法表示。表面模型由一

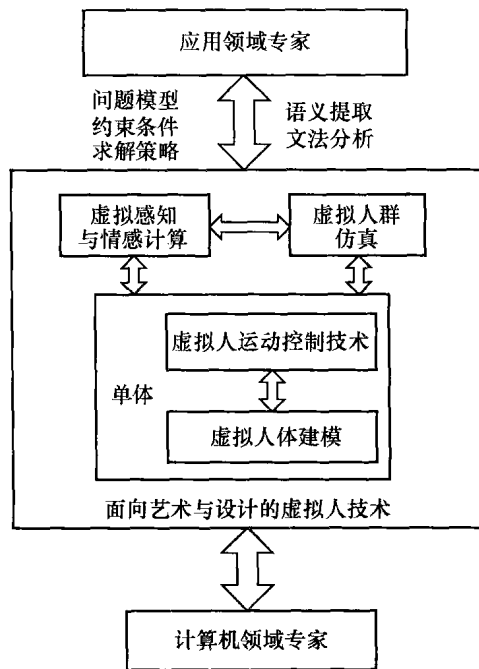


图 1-1 虚拟人技术

系列多边形或曲面片的表面将人体骨骼包围起来表示人体外形。主要有多边形法、参数曲面法 (Bezier 曲面、B 样条曲面、NURBS 曲面) 和有限元法等。表面模型真实感较强,但数据量大,计算复杂而且建模速度较慢。

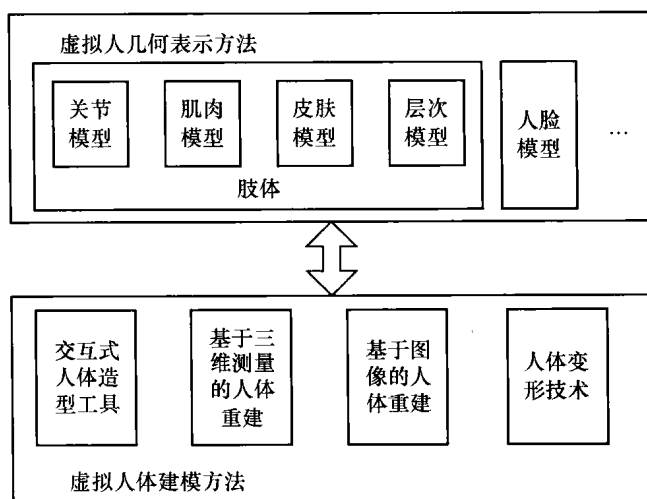


图 1-2 虚拟人体建模技术的研究层次

为了克服上述单一方法的不足,目前形成了一种分层表示模型^[14]。该模型综合了上述几种表示方法的优点,可以满足不同层次的逼真性要求。由基本骨架、肌肉层和皮肤层构成,有时也加入服饰层,表示虚拟人的头发、衣饰等人体装饰物品。其中的基本骨架由关节确定其状态,决定了人体的基本姿态;肌肉层确定了人体各部位的变形;皮肤变形受肌肉层的影响,最终由皮肤层确定虚拟人的显示外观。在人体运动过程中,皮肤的形变随着骨骼的弯曲和肌肉的伸展与收缩而变化。

虚拟人体的建模方法,主要研究在计算机生成空间里创建逼真的虚拟人体的方法,解决“怎么做(How to)”的问题,属于“方法学”的研究范畴。

通过交互式人体造型工具创建人体的方法目前应用较多,比如利用 POSER、3ds Max 和 Maya 等造型软件进行人体建模,但这种方法要求造型师能够对人体的几何特性有很准确的把握,因此在一定程度上限制了其应用范围。最好的方法是直接从现实世界中构建人体模型^[15]:① 基于三维测量的人体重构技术。三维人体测量主要有基于激光的扫描技术和基于莫尔波纹的投影技术两大门类,前者的代表性产品有 Cyberware 系统和 Laser Dsign 系统,后者为 PMP 系统。它们均可以获取除被姿势隐藏的部位以外的人体各处的三维数据。医学领域应用较多的 CT(计算机 X 射线断层扫描)和 MRI(核磁共振成像术)方法不仅能够获取人体的表面信息,而且还可以得到诸如骨骼和肌肉的内部结构。这些附加结构对于更加精细的虚拟人体建模、人体动画以及在手术模拟等医学应用中非常有用。② 基于图像的人体模型重建。这种方法根据计算机视觉原理,通过分析目标物体两幅图像或多幅图像序列,恢复其三维形状,这就是所谓的从运动恢复形状(Shape from motion)或从运动恢复结构(Structure from motion)技术。目前主要有如下两种研究思路:① 基于二维(2D)图像的人体重建技术,输入数张照片,基于标准模型的方法从 2D 图像重建人体的 3D 模型,比如 W. Lee 等人^[16]基于 H-Anim 1.1 的标准模型,分别从两张和三张照

片中重建出具有照片真实感的人脸模型和人体模型;② 基于视频序列的人体重建技术^[17],比较多地应用于人体模型与运动信息的提取和重建中。

基于三维测量的人体重构技术需要价格昂贵的 3D 扫描设备,对颜色的分辨率低,缺乏真实感,受人体表面性质(如毛发)的影响,有一定的测量误差,扫描结果需要专门的尺寸提取软件进行后处理,以适应艺术与设计领域虚拟人研究的需要。基于图像的人体模型重建方法受图像质量影响较大,所构建的人体模型也存在较多误差,对设计领域的应用来说可能是不足的,但其建模速度快而且真实地记载颜色信息,可以有效地用于艺术领域的动画实践中。

在对基于三层模型的肌肉模型的方法支持上,这些方法都有所欠缺,往往涉及复杂的运动学计算和有限元分析计算,计算量非常巨大,同时这些方法在人体建模方面都缺乏创造性,人体模型数据也难以重用,应用范围有限。因此研究人员又提出一些新的技术和方法:A. Witkin 等人^[18]使用椭圆体的元球(Metaball)模拟骨骼、肌肉和脂肪组织的大体行为,这是一种隐曲面造型技术,采用具有等势场值的点集来定义曲面,方法简单直观,与隐式曲面、参数曲面和多边形曲面结合使用,可以产生非常真实健壮的人体变形;R. Turner 等人^[19]使用基于物理的方法,用连续弹性平面仿真人体表面;L. P. Nedel 等人^[20]采用基于解剖学的人体变形技术,能更好地模拟由人体关节运动引起的肌肉变形。总之,高效真实地建立具有很宽应用领域的人体模型是建模方法学研究的不懈追求。

人脸的建模与肢体的建模相比较,更强调几何形状的不规则性,因此也更复杂。目前,主要有如下两类人脸建模的方法^[21]:几何处理的方法和图像处理的方法。几何处理的方法包括:参数化方法、有限元方法、基于肌肉的建模方法、使用伪肌肉的可视化仿真、样条建模和自由变形方法等。图像处理的方法包括:纹理映射、图像融合和 Vascular 表达方法等。

在人体几何建模方面,本书第 2 章提出了一种基于空间几何变形技术的参数化人体建模技术。该技术的主要算法思想是:空间几何变形是曲面造型的核心技术,其通过对基本实体或已有模型进行修改来实现二次建模;我们将该思想引入到对人体重建的研究,为了避免因直接操作底层几何基元而带来的低效性,对于如何选取合适的人体特征作为变形依据,以及如何有效地对人体模板进行修改,我们都提出了一种解决方法,该方法更侧重于特定形态人体的生成而非精确重建。在特征参数选取方面,该方法结合了人体测量学相关理论,对人体模板的修改则基于图形学轴变形技术,所实现的建模系统操作简单直观,特别适合实时仿真应用对个性化人体模型的需求。

在人机工程学领域中所需的人体模型与动画游戏类领域中的人体模型有很大的不同。基于这种考虑,在本书第 7 章我们提出了一个面向人机工程的虚拟人生物力学模型,该模型由基于生物力学的人体几何建模、基于生物力学的虚拟人外力模型和基于生物力学的虚拟人肌肉力预测模型等几部分构成。

1.3.2 虚拟人运动控制技术

虚拟人除了有几何属性外,还需要有逼真的运动和行为特性,虚拟人运动控制技术则是关于这两种人类特性的数字化再现的研究。其目的是实现逼真的虚拟人运动或人体动画。人体运动可以从多角度来解释,因此运动控制的研究手段也可以多样化:运动是一种信息载体,可以用有信号处理的方法^[22];运动是物理的,可以有基于物理的方法,如 Z. Popovic 和 A. Witkin 的研

究^[23];运动是曲线,可以有计算机图形学的解决方案,如文献[18,24];运动也是一种模式,可以有模式识别的方法,如文献[25]。但从运动控制的复杂程度看,其研究内容可以从3个层次展开,如图1-3所示。

底层(Low Level)方法在控制虚拟人运动时,直接指定虚拟人运动参数,如关节角度值或每个关节的位置。常用方法如下^[26]:① 关键帧(Keyframe)方法。这是由过去的关键帧动画技术演化而来的。给定人体运动过程中的一些关键姿态(关键帧)后,该方法通过插补算法得到若干中间姿态(中间帧),从而生成人体运动。这种方法简单直观,得到动画师的广泛应用,但人体有近百个自由度,手工给出每个关键姿态下的每个自由度是非常困难的,且其物理逼真性也难以验证。② 基于物理(Physically-based)的方法。基于物理的方法^[23]利用动力学、生物力学等物理定律产生运动。根据人体各关节所受的力与力矩,计算出人体各关节的加速度、速度,最后确定人体运动过程中各姿态,因此所生成的运动符合物理规律,具有物理逼真性。但该方法要求运动控制人员确定人体各关节所受的力与力矩,通常比较困难。

③ 逆运动学(Inverse Kinematic)方法。该方法^[27]源于机器人学中关于链杆运动的处理,它在给定链杆末端的位置与方向时,计算出关节链结构的状态矢量,进而得到各关节的空间位置。这种方法的计算量比较大,而且,所生成运动的逼真性仍然依赖于人的手工操作,难以验证。④ 过程(Procedural)方法。对于一些周期性的人体标准运动,如行走、跑步,可以根据实验数据,建立相应的经验公式,以此生成虚拟人体运动^[28]。这种方法具有很好的逼真性,而且易于交互控制,解决一些特殊类型的运动是十分有效的。但是角色动画运动缺乏表情或个性,其适用范围有限。⑤ 运动捕获(Motion Capture)方法^[29]。通过专门的传感器(电磁、光学、机械)记录真实的人体运动数据,并将其映射到虚拟人体上。这是目前商业产品中常用的运动生成技术,可以很容易地获得人体的运动数据。

应用底层方法,可以生成大量逼真的运动片段(Clips 或者 Segments),但人体运动相当复杂,运动的方式也千变万化。为了在已有运动的基础上,生成更为复杂逼真的虚拟人运动,常常需要对已有的运动进行运动编辑和合成^[30],根据所涉及运动的数目不同可将运动编辑与合成技术分成如下两大类:① 单个运动内的编辑操作。运动偏移映射(Displacement Mapping)在保留原始运动的细节以及整个运动的连续性前提下,调整某些帧的人体姿态以生成新的运动;运动重定向(Retargeting)将一个角色的运动定向到另一个有着不同的层次结构和几何尺寸的角色上;运动变形(Warping)改造已有的运动数据,使运动满足一系列约束;运动平滑(Smoothing)使二维或者三维的运动数据变得更加真实流畅;运动的循环操作(Circulating)将已有的运动规范化,生成可以循环变化的新运动,如行走、跑步等;运动的再参数化(Reparametrizing)在时间和空间上对运

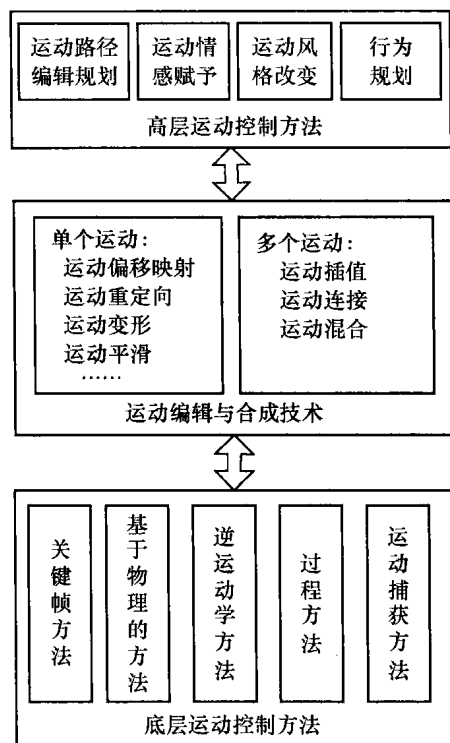


图 1-3 运动控制技术的三个研究层次

动参数进行调整以产生新的运动;运动修剪(Clipping)从一段已有的运动中提取某一段运动从而生成一个新的运动片段;运动选择(Selecting)将一个已有运动的某些关节运动关闭,保留另外一些关节的变化;运动镜像(Mirroring)变换一个已有运动的左右方向等。② 多个运动之间的编辑操作。运动插值(Interpolating)将两段运动中整个身体的运动根据不同的加权系数通过插值形成新的运动。比如有一段“行走”运动和一段“跑步”运动,选用不同的加权系数进行运动插值,可形成诸如“快走”、“慢跑”等新运动;运动连接(Transiting)将两段运动连接起来,如果参加连接的两段运动相同,那么连接操作就变成了运动的循环操作,运动连接所要解决的一个核心问题是运动之间的平滑过渡,做到无缝连接;运动混合(Blending)将身体某部分的运动替换成另一段运动中的对应部分。

高层(High Level)方法则是立足于艺术与设计领域的具体应用,在底层方法和运动编辑与合成技术的基础上,生成更为复杂的虚拟人运动,可以有如下控制技术:① 运动路径编辑规划。对给定运动的路径进行编辑,而运动特性(动作序列、速度等)保持基本不变,或者任意给定虚拟人行走的速度和方向。② 运动风格改变。比如,可以将普通人的行走步态更改为模特儿的行走步态。③ 运动情感赋予。例如,M. Unuma 等人^[31]通过对运动数据进行 Fourier 级数展开和抽取性情参数,提出了用情绪控制运动角色的方法。K. Amaya^[32]利用信号处理的方法,基于已知运动实例建立“情感转移式”,进而应用于其他运动中,产生带有情感的运动。④ 行为规划。虚拟人可以根据环境的变化而对自己的运动做适当的智能处理,比如可以从众多运动片断中自动提取出有效运动,然后自动合成新的运动。

高层运动控制技术的实现往往需要一个设计良好的体系结构的支持;Badler 提出一种称为并行传输网络(Parallel Transition Networks)的方法^[5]。其采用基于条件的并行组织结构和非线性性的运动模型,每个运动片段可以在转换到其他节点时触发、修改或停止。这对于实现一些自主行为与交互式虚拟人运动是非常关键的。Rose 也提出了一种类似的运动转换图(Verb Graph)^[30],实现不同人体动作与行为之间的跳转,生成逼真的人体动画。

在虚拟人的角色动画合成方面,我们开展了一系列的研究工作,主要分为如下 4 个方面:

(1) 在虚拟人的真实感人体动画合成方面,本书第 3 章介绍了基于骨架驱动的虚拟人皮肤网格变形动画技术,该技术通过使用改进的骨骼皮肤混合算法,来克服以往方法中经常出现的皮肤打结现象,从而得到了对于复杂人体运动仍然非常自然的三维人体动画。

(2) 在虚拟人的运动建模方面,本书在第 4 章中,首先概述了基于运动学的建模技术、基于动力学的建模技术、基于物理的建模技术这三类方法;然后提出了面向人机工程仿真的人体运动建模方法,该方法由基于逆向运动学的人体运动控制和基于运动捕获数据的运动重定向方法两个部分所构成。

(3) 在虚拟人的运动编辑方面,本书第 5 章中详细介绍了运动编辑的基本概念、运动编辑的基本操作、基于多层次 B 样条的运动路径编辑方法、从运动捕获数据中提取关键帧的算法,最后详细介绍了运动编辑系统 Eidolon 软件的设计与实现。

(4) 在虚拟人的高层次运动合成方面,本书第 6 章介绍了虚拟人步态模型的研究方法与主要研究内容。主要有步态的运动表示、步态的运动生成、步态参数控制(高层控制参数与底层控制参数)等,最后介绍了面向服装展示的虚拟人步态模型研究。

1.3.3 虚拟人群仿真

虚拟人群仿真的研究立足于人类的社会性。在虚拟环境中,群(Crowd)中可能包含多个组(Group),每个组可以有相同或者不同的行为模式;组中可能包含多个个体(Agent),而个体也可能有相同或者不同的行为模式。

在虚拟人群仿真的研究中,针对不同的应用需求,其问题模型的复杂程度是不同的,因此人群仿真的研究也应该有不同的侧重点。Musse 和 Thalmann 的做法比较有代表性,他们^[33]根据自治程度将虚拟人群分为被指导的群、可被编程的群和自治的群,由此提出的 ViCrowd 系统^[34]按照层次结构创建群体行为。根据不同的应用需要,虚拟人群的行为建模与仿真采用不同的自治形式。同时,虚拟人群中的组(Group)、组中的每一个个体以及虚拟环境中的虚拟对象(Object)也可以采取这3种不同的自治形式^[35]。

具体来说,虚拟人群仿真技术包括虚拟人群的实时可视化、行为建模与仿真等内容。

实时可视化的研究需要满足虚拟人群仿真中显示的真实感和速度要求,其研究内容包括碰撞检测和快速绘制。碰撞检测对于虚拟人群中的路径规划、自动避障以及真实感显示极为重要。碰撞检测在计算几何和机器人等领域得到了广泛的研究,形成了一些较为成熟的技术。在虚拟人群仿真中,主要研究动态的碰撞检测技术,也就是检测虚拟人活动的空间区域是否与环境对象或者其他虚拟人相交的问题。目前,F. Tecchia 和 S. Bandi^[36,37]的研究比较有代表性,采用空间分解法(Space Decomposition)实现人群仿真中的动态碰撞检测。常见的快速绘制方法可以分为三类:遮挡选择法(Occlusion Culling Methods)、LOD方法和基于图像的绘制(IBR)方法。遮挡选择法需要将空间分为很多小单元并有效组织其中的几何体数据库,不适合于变形、移动的虚拟人群的快速绘制,因此实践中 IBR 和 LOD 方法应用较多,比如文献[38,39]中采用了 IBR 方法,文献[40,41]中则采用了 LOD 方法。IBR 方法在处理大规模人群绘制的问题上更为有效,而 LOD 方法可以更为精细地表达虚拟人群的几何特征。结合虚拟人群仿真的特点,借用其他成熟算法有效地实现实时可视化是目前关注重点。

虚拟人群的行为建模与仿真需要和虚拟人的多功能感知与情感计算的研究紧密结合起来。目前比较典型的群体仿真系统采用基于规则的方法予以实现。C. W. Reynolds^[42]提出的分布式行为建模系统对鸟类和鱼类的群体行为进行仿真,用3条按优先级递减的原则(分隔、匹配和吸引)有效控制群体的行为。M. J. Mataric^[43]的方法则是基于人群的一些自然行为来定义群体的行为,系统定义了四种基本行为:逃避、跟随、聚拢和散开。X. Tu^[44]的人工鱼系统将人工鱼模型分为三种子模型:外貌形态模型、内部结构模型和感知行为模型,并在感觉系统和运动系统基础上构建其行为系统。人工鱼群体是一种典型的多智能主体的分布式人工智能系统,每条人工鱼都是一个自主的智能体,人工鱼群的社会具有某些自组织能力和智能集群行为。

在安全科学的人群仿真研究中,粒子系统的理论和方法应用较多,比如 G. K. Still 的博士论文^[45]从物理学角度对虚拟人群建模展开研究。E. Bouvier^[46]使用粒子系统理论研究人群的移动,建立了类似于电场的人群中的“决策场”概念。文献[47,48]基于社会心理学和物理学,用粒子系统的原理研究紧急状态下人群的行为模式。

目前又出现了参数化的研究方法^[49],以参数化的形式定义个体和组。其中个体的属性包括交互计数器(IC)、社会性(Sociability)、通信能力(Communication)、舒适度(Comfort)、速度

(Velocity)、感知力(Perception)和记忆力(Memory);组的属性则用聚合率(Cohesion Rate)来描述。这是虚拟人群的行为建模与仿真研究中新的思路。

在本书第8章,我们研究了群体文化活动复原中智能个体行为,主要包括智能行为决策、感知建模、行为规划与实现以及群体行为中的随机行为等方面的内容,最后通过一个基于自主交互的群体文化活动重建实例,带给读者关于群体行为建模的直观感受。

1.3.4 虚拟感知与情感计算

虚拟感知与情感计算的研究立足于人类的感知和情感特性。这在交互游戏、虚拟主持人、虚拟会展的智能导游、虚拟商场的智能导购等应用领域表现得非常明显,在高层运动控制技术的研究中也发挥着重要的作用。该研究包括虚拟人的多功能感知、情感计算和交互技术等方面的内容。

关于多功能感知的研究,主要有如下3种方法^[50]:①带状(Zonal)方法。在虚拟人周围形成一个或者多个感知区域,进入到感知区域中的对象将被感知到。如C. W. Reynolds^[42]的系统,使用属于每一个个体的球形感知区域以实现视觉感知。②传感器(Sensory)方法。给虚拟人配置多种虚拟传感器以感知环境信息。比如文献[8]基于环境的三维几何信息构建听觉场,虚拟听觉传感器可以直接从这个听觉场中获取声音事件的位置信息和语义信息,触觉系统的建立则与碰撞检测过程直接关联。文献[51]采用从z-buffer中恢复场景的方法感知可见场景的深度信息,并根据对物体的颜色编码区分不同的物体。这种方法对感知的仿真程度依赖于虚拟环境中虚拟对象对可感知特性的模型复杂度。③合成视觉方法。不同于真实世界中的视觉,合成视觉方法不需要进行距离检测和模式识别等工作。比如文献[52]提出用启发式搜索的方法建立动态八叉树作为虚拟人的视觉记忆,其内容是环境的背景信息。文献[53]基于认知心理学中的阶段学说,采用目标驱动的方法构建虚拟人的合成视觉。

这些方法虽然实现了虚拟人一定程度的感知,但都需要构建背景感知环境并借助一种查询机制实现,对虚拟人而言,这种感知是被动实现的。虽然这对于人体动画的实现已经足够了,但对于智能虚拟环境中的虚拟人研究却很不充分,因此需要实现虚拟人的主动视觉。主动视觉研究是近年来计算机视觉领域中一个比较活跃的分支,所采用的技术主要是不确定性推理技术,包括贝叶斯网络、D-S证据理论、模糊集理论与神经网络等。具体地说,主动感知研究,包括感知信息的获取、感知对象的估计、感知信息的融合与感知动作的规划。T. F. Rabie等人的研究中,探索性地提出一种基于视网膜的仿生主动视觉技术,将环境的三维信息投影到双眼的视网膜上形成二维图像,用模式识别的方法得到关于环境和对象的视觉信息。结合基于物理的人体仿真的研究,文献[54]将这种方法成功地应用于虚拟人系统DI-GUY中,初步实现了虚拟人的主动感知。

在计算机情感或情感计算的研究上,主要集中在情感发生和情感表达上。目前,情感计算的一般方法是把情感看做主体和环境交互作用的结果,根据领域知识建立起情感知识库,利用知识发现的方法来抽取动作与情感之间的情感映射关系,然后通过肢体动作和面部表情的变化将情感表达出来或对虚拟人进行训练,使虚拟人表现出恰当的肢体动作或表情。

情感发生的研究可以归纳为如下两类方法:①交流驱动的方法。虚拟人根据用户指定的模式选择情感表达方法,比如C. Pelachaud等人^[55]使用面部表情传递情感;在Cosmo系统^[56]中,虚