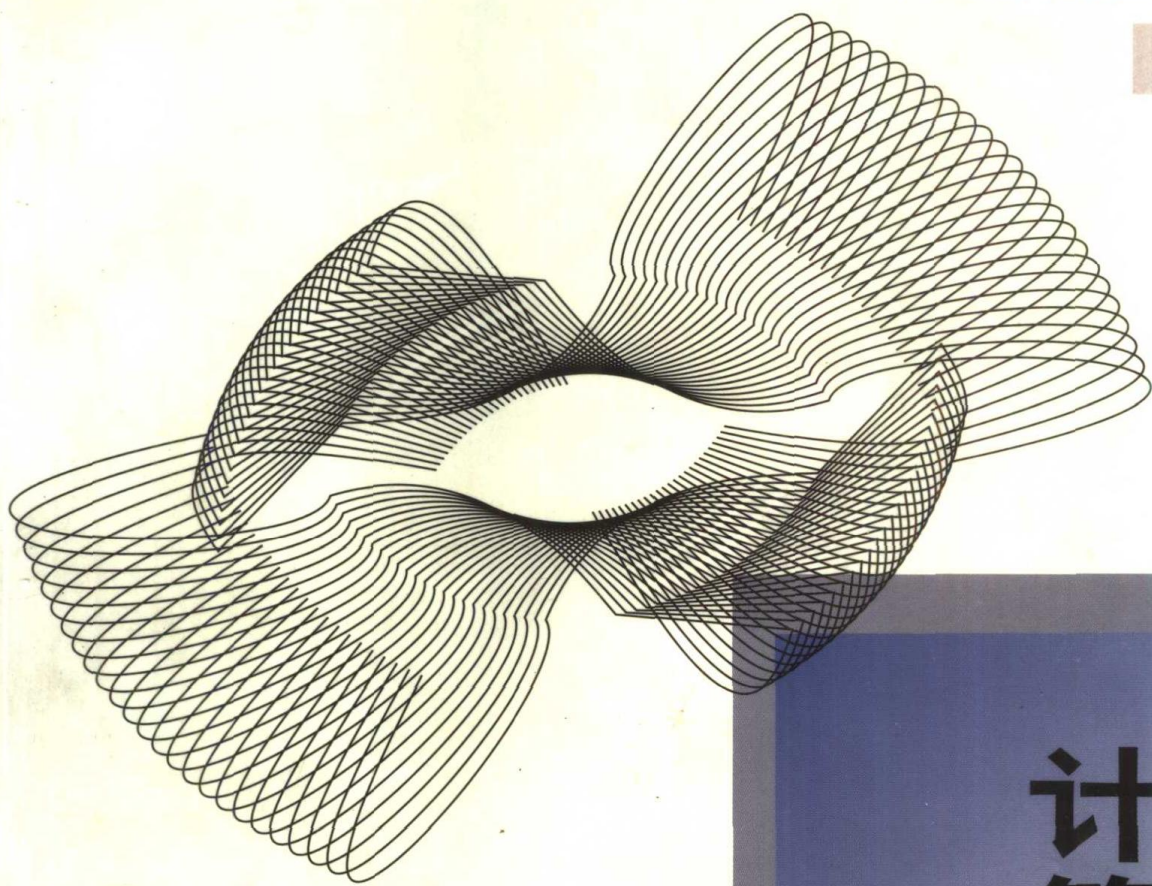


国家九五重点图书

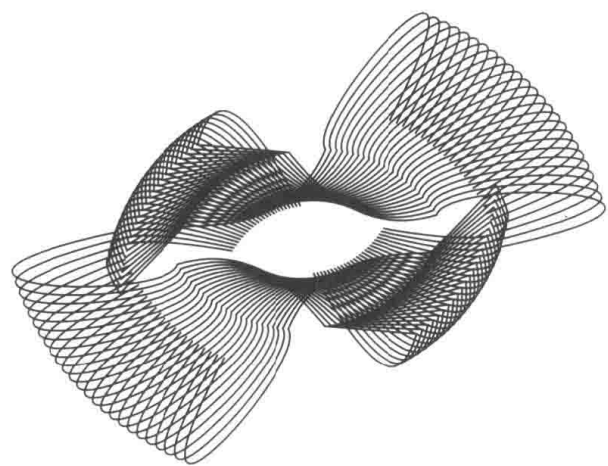
计算机应用技术前沿丛书



计算机动画的算法基础

鲍虎军 金小刚 彭群生 编著

浙江大学出版社



国家九五重点图书

计算机动画的算法基础

鲍虎军 金小刚 彭群生 编著

计算机应用技术前沿丛书

图书在版编目(CIP)数据

计算机动画的算法基础 / 鲍虎军等编著. — 杭州:
浙江大学出版社, 2000.12
(计算机应用技术前沿丛书 / 潘云鹤主编)
ISBN 7-308-02162-9

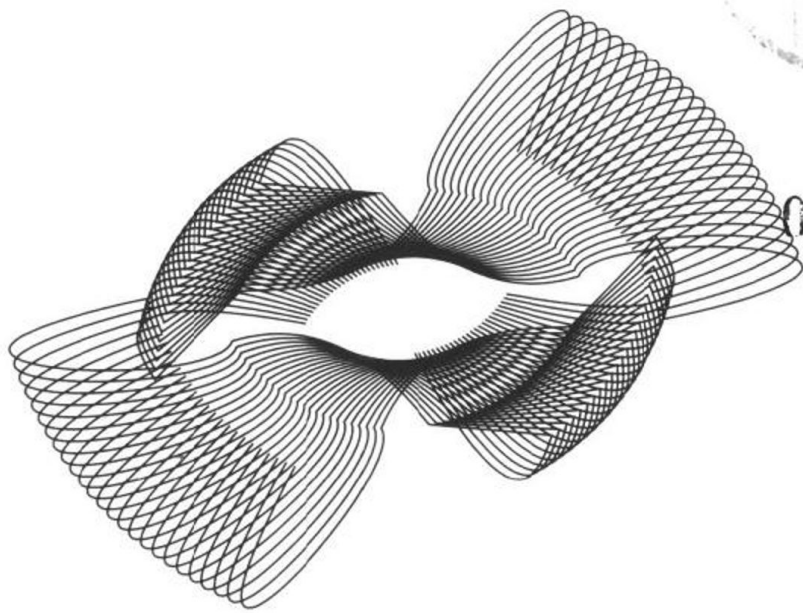
I. 计... II. 鲍... III. 动画-计算机图形学-算法理论
IV. TP391.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 46563 号

总 责 编 陈晓嘉 梁 兵
封面设计 俞亚彤
版式设计 孙海荣
责任绘图 姚一鸣
责任出版 李慧华

出版发行: 浙江大学出版社
(杭州浙大路 38 号 邮政编码 310027)
(E-mail: zupress@mail. hz. zj. cn)
(网址: <http://www.zjupress.com>)

责任编辑: 陈晓嘉
排 版: 浙江大学出版社电脑排版中心
印 刷: 浙江印刷集团公司
经 销: 浙江省新华书店
开 本: 889mm×1194mm 1/16
印 张: 30.75
字 数: 722 千
版 印 次: 2000 年 12 月第 1 版第 1 次印刷
书 号: ISBN 7-308-02162-9/TP·182
定 价: 60.00 元



00150572

主 编 潘云鹤

副主编 陈 纯

顾 问(以姓氏笔划为序)

王 选 李三立 李国杰 李衍达

沈昌祥 张 钹 张效祥 汪成为

何志均 杨芙清 金怡濂 陈火旺

胡启恒 唐泽圣 戴汝为

1985



序

20 世纪是一个科技、经济空前发展的时代,从世纪初相对论、量子理论的创立到今天以信息产业为龙头的高科技产业成为经济发展的第一支柱,人类社会发生了根本性的变革。而在这场以科学技术为社会发展直接动因的变革中,意义最深远、影响最广泛的就是计算机及其相关技术的发展和运用。

在过去的 50 年里,计算机已从最初的协助人类进行精密和复杂运算的单一功能的运算器发展成为能够模拟人类智慧、感觉,可以适应环境、具有多种功能的设备;计算机及其技术的应用已从尖端科学、国防工业延伸到了人类活动的各个领域。它不仅充实和革新了传统的科学与技术研究手段,带来了新的方法和理念,成为科学技术谋求新发展的沃壤,而且作为信息处理的核心工具和技术支撑起庞大的信息产业,进而改变了全球的产业格局。

目前,一个由遍布全世界的计算机连接起来的跨越国界、巨大而高速的多媒体信息网络正在形成,因此,不仅信息产业本身,而且各行各业都将面临计算机应用技术研究和发展的重大课题。我们针对国内外有关计算机应用技术的最新进展,根据浙江大学及国内其他学者在计算机辅助设计系统和方法、计算机动画、设计思维模拟、自主式智能系统、智能决策系统、软件智能化技术、工程数据库管理系统、图象与声音

压缩技术等方面取得的成果,组织编撰了《计算机应用技术前沿》丛书。我们希望,通过这套书,为从事相关领域研究工作的专家和学者提供一些有参考价值的方法和技术,为普及、推广,进而开拓计算机及其网络的新的应用技术作出一点贡献。

潘云鹤

一九九九年十月

前 言

随着三维动画广告在电视屏幕上的频频播映,计算机动画已经悄无声息地走进了人们的日常生活。计算机动画是采用计算机技术生成的一系列动态画面。人的视觉生理表明,眼睛具有视觉残留特性,即瞬间映现在视网膜上的画面不会立即消失。当屏幕以每秒 25 帧以上的速率播送计算生成的序列画面时,一幅幅离散画面即在人的视网膜上串接成连续的动画。计算机动画既可以是它所描述角色的形象或位置的连续变化,也可以是画面中光照情况的连续变化或观察者视点位置和视线方向的连续变化。上述变化可以基于客观世界中的物理规律或人们日常生活中熟知的行为方式,也可以源于艺术家的精巧构思和大胆创意。前者广泛应用于科学演示、工程仿真、教育训练、军事模拟以及虚拟现实中,后者广泛应用于广告设计、影视特技、电子游戏等。随着计算机动画技术的发展,目前采用计算机图形工作站和先进的动画软件所生成的三维动画可产生非常逼真的效果,以至于达到以假乱真的地步。尚在设计的城市小区在计算机动画中可变成拔地而起的高楼,早已绝迹的古代恐龙可以在屏幕上成群地奔逐,种种不可思议的奇迹可以凭借计算机动画技术而神奇地再现。

我国对计算机动画技术的应用研究始于 90 年代初期。1992 年,北京工业大学 CAD 中心和北京科教电影制片厂联合完成了一部完全

采用计算机动画技术制作的科教影片《相似》。1993年,他们又同香港的先涛公司、ACC公司合作制作了北京申办2000年奥运会的动画宣传片《北京欢迎您》。1994年,浙江大学CAD&CG国家重点实验室则采用计算机动画技术再现了秦始皇兵马俑攻城略地的战斗场面。随着计算机三维动画软件用户界面的不断完善,采用计算机动画技术的广告制作公司遍布神州大地。与此同时,计算机动画技术在视景仿真、城市建筑规划、科学计算可视化等方面也获得了成功的应用。

与计算机动画应用大步发展形成对照的是,国内对计算机动画基础理论与算法的研究仍局限于极少数高等院校和科研院所。有关计算机动画基础理论与算法设计方面的专著在国内甚难寻觅。基础理论研究的相对滞后阻碍了我国计算机动画技术应用水平的提高和具有自主知识产权的动画软件的开发。广大从事计算机动画技术研究和开发的科技人员急需一本这方面的中文专著,作为他们入门的向导。

浙江大学是我国较早从事计算机动画理论与算法研究的单位之一,多年来,一直围绕二维、三维景物的变形(deformation)和渐变(morphing)展开研究,在国内外核心期刊和国际学术会议上发表了相关论文20余篇。与此同时,参与制作了一大批优秀的电视节目片头和三维动画广告。1994年,为研究生开设了《电脑动画与仿真》课程(54学时)。本书即是依据我们多年的教学经验和研究实践编写而成的。全书共分8章。作为引言,第1章简述了计算机动画的发展历史和国内外的应用现状,介绍了目前常用的计算机动画制作商业软件。考虑到单帧画面的绘制是生成计算机动画的基础,本书第2章、第3章分别介绍了三维场景几何造型技术和真实感画面的绘制技术。动画是运动中的艺术,变化是动画的灵魂,本书第4章介绍了计算机动画制作中常用的关键帧插值技术,包括参数关键帧技术、样条驱动动画技术、动态景物方位和朝向插值技术等。本书第5章介绍了过程动画技术,即如何依据一定的物理规律或数学函数,描述景物在运动变化过程中每一瞬间的位置和形态。该章特别讨论了气体、流体、火焰、云彩等不断变幻

的景物的三维形态表示和动态生成。在动画中,除了景物位置、朝向的变化外,还经常通过形变赋予角色以灵性,渲染某种夸张的效果。本书第6章详细介绍了各种二维、三维的形变和渐变算法,包括整体变形、自由变形(FFD)、轴变形和基于广义元球的一般约束变形等。关节动画和表情动画是计算机动画技术描写一个角色不可或缺的环节,计算机动画的最大挑战是如何用虚拟的人代替真实的演员在舞台上进行生动传神的表演,本书第7章介绍了这方面的基本概念和算法;而第8章则讨论了基于物理的动画技术。这样,只需给出动画中景物的质量、弹性、转动惯量及所受外力,即可依据一定的动力学方程,求解物体在运动中每一瞬间的位置、方向和形状。

本书的特点是取材全面,内容系统,注重对计算机动画基础理论和各类实用算法的介绍和分析,既可作为大专院校计算机系学生的教学用书,对从事计算机动画技术研究和开发的工程技术人员、电脑动画制作人员,也有较大的参考价值。

本书由鲍虎军和彭群生制定编写大纲,第1,2,3,5,7,8章由鲍虎军撰写,第4,6章由金小刚撰写,彭群生对全书进行了仔细的统稿和校对。金叶英、刘新国、冯结青等参与了文稿的打印整理工作。

本书第一、二作者分别得到了国家杰出青年基金、国家自然科学基金和浙江省自然科学基金的资助。在本书编写过程中,得到了我国图形学前辈们的大力支持和指导。在此,特向他们表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中的错误和疏漏在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

2000年10月

目 录

1 计算机动画简介

1.1 计算机动画的发展历史	1
1.2 计算机动画技术的应用	3
1.3 计算机动画的研究内容	6
1.4 计算机动画系统的硬件配置	7
1.5 商业动画软件简介	8
1.6 小结	17

2 三维几何造型技术

2.1 体素构造表示法	20
2.2 边界表示法	22
2.3 参数表示与多边形网格表示	25
2.4 Bézier 曲线	26
2.5 Bézier 样条曲线	28
2.6 B 样条曲线	34
2.7 B 样条曲线的递推计算	36
2.8 B 样条曲线的分割	37
2.9 B 样条曲线的升阶	39
2.10 Bézier 曲面及其离散剖分算法	40
2.11 Bézier 曲面的光滑拼接	41
2.12 B 样条曲面及其插值	43
2.13 常用曲面的构造	45
2.14 Trim 曲面	51

2.15	Catmull-Clark 样条曲面	55
2.16	小结	57
3	真实感图形绘制技术	
3.1	虚拟摄像机模型	62
3.2	光照明模型基础	72
3.3	简单画面绘制	95
3.4	标准光线跟踪算法	104
3.5	光线跟踪几何	108
3.6	分布式光线跟踪算法	112
3.7	加速光线跟踪算法	116
3.8	光线跟踪算法中的反走样技术	130
3.9	纹理映射技术	133
3.10	辐射度方程的求解技术	157
3.11	小结	168
4	低层运动控制方法	
4.1	参数关键帧技术	181
4.2	样条驱动动画技术	183
4.3	速度曲线	189
4.4	一般化的运动学控制技术	191
4.5	样条基函数的选取	192
4.6	物体朝向的欧拉角表示和插值技术	196
4.7	物体朝向的四元数表示和插值技术	200
4.8	小结	222
5	过程纹理造型和动画技术	
5.1	三维纹理映射技术	224
5.2	过程纹理造型技术	225
5.3	过程纹理的动画技术	240
5.4	Fourier 合成技术	261
5.5	基于语法的造型技术	264
5.6	粒子系统方法	270
5.7	小结	272
6	Morphing 和空间变形动画技术	
6.1	二维多边形形状渐变	276

6.2	二维图象 morphing 技术	286
6.3	三维 morphing 技术	299
6.4	整体和局部变形方法	309
6.5	自由变形(FFD)技术	314
6.6	轴变形方法	329
6.7	基于约束的变形	337
6.8	空间变形中的反走样问题	355
6.9	元球的造型和动画技术	356
6.10	小结	368
7	关节动画及表情动画技术	
7.1	关节链结构的基本概念	374
7.2	关节链结构表示	376
7.3	关节链结构的运动求解技术	378
7.4	逆向运动方程的求解	380
7.5	复杂骨架的层次构造及其运动控制	389
7.6	两足行走模型	391
7.7	骨架驱动的肌肉模型	394
7.8	脸部表情动画技术	398
7.9	小结	408
8	基于物理模型的动画技术	
8.1	刚体运动方程	412
8.2	运动方程的数值解	416
8.3	运动模拟及数据结构	423
8.4	非贯穿约束刚体动力学	431
8.5	关节链结构运动的动力学模拟	452
8.6	布料变形动画技术	458
8.7	小结	473

1 计算机动画简介

计算机图形技术无需任何材料即可构造和表现三维物体,这使它日益成为一种重要的仿真手段。虽然在日常生活中,我们所接触到的计算机图形多是一些茶壶、商标、汽车、建筑物、人体、分子、云彩、山脉或昆虫等,而实际上,在计算机内存中,它能构造和表现的虚拟景物类型是无限的。计算机动画将时间变量引入到虚拟的静态景物世界,使得我们不仅能够操作三维景物,而且可以建立起逼真的景物运动。

计算机动画技术综合利用了计算机科学、艺术、数学、物理学和其他相关学科的知识来生成绚丽多彩的连续的逼真画面^[1]。该技术所关心的并不仅仅是物体的运动,其研究内容还包括虚拟摄像机的运动变化、光源的运动变化、画面色彩的变化,甚至还包括确定演员脸上微笑动作出现的频率等。而由于这些动作参数的运动控制非常复杂,导致了許多高效计算机动画算法的诞生^[2]。可以说,运动变化是动画的本质,因而动画可以定义为变化的序列画面,其中后一帧画面都是前一帧画面的修改。本书的出发点是为读者提供这些算法的详细描述,以使广大计算机爱好者、研究者对计算机动画的原理、算法及实现方式有一个全面的了解。

为此,本章首先从计算机动画的历史出发,对该技术作全面的介绍。

1.1 计算机动画的发展历史

本质上,动画就是对场景中的景物赋予“生命”。在传统的卡通动画和最近发展起来的计算机动画中,这种生命通常表现为一些连续序列的画面。由于人类的视觉系统能够将这些序列画面组合起来形成一种连续的视觉,因而,这种表达方式充分满足了动画的运动变化特性。

当图象序列画面以一定的频率显示时,我们所观察到的序列画面将不再闪

烁,其运动效果非常连续。一般来说,这种频率依赖于图象的亮度。例如,电影的显示频率为 24 帧 / 秒,但一个旋转刀片通常打断一帧图象画面二至三次,使得画面的刷新频率变为 48Hz 或 72Hz,从而更有效地防止了由于画面很亮引起的闪烁现象。类似地,我国采用的电视制式 PAL 系统的显示帧频为 25 帧 / 秒。事实上,若以 25Hz 的刷新频率显示画面时,我们还能发现序列画面的闪烁现象。为此,在实际播放系统中,每帧画面均被分解成奇、偶二场,奇数场由画面的奇数扫描行组成,而偶数场则由偶数扫描行组成。播放时,奇、偶二场交替显示,使得画面的刷新频率变为 50Hz,从而有效地提高了画面变化的连续性,减少了闪烁现象。美国的 NTSC 制式具有类似的性质,其显示频率为 30 帧 / 秒,二场刷新频率为 60Hz(精确值为 59.94Hz)。显然,不管采用何种制式,为生成连续的动画序列,均需付出大量而艰苦的劳动。

在传统卡通动画的制作过程中,导演首先将剧本分成一个个分镜头,然后由主动画师确定各分镜头的角色造型,并绘制出一些关键时刻各角色的造型;最后由助理动画师根据这些关键形态及其时间间隔,绘制出从一个关键形态到下一个关键形态的自然过渡,并完成最后的填色及合成工作。依次拍摄一帧帧连续画面,就得到了动画片段。容易发现,虽然主动画师在卡通动画的制作过程中起着非常重要的作用,但大量枯燥的工作主要由助理动画师完成。因而,一个自然的想法是借助计算机来减轻助理动画师的工作,以提高卡通动画的制作效率。

1964 年,贝尔实验室的 K. Knowlton 首次尝试利用计算机技术来解决上述问题,从而宣告了计算机辅助动画制作时代的开始^[3,4]。从计算机图形学的发展来看,20 世纪 60 年代是计算机图形学的萌芽和初始发展时期。在 70 年代,由于人们加强了对它的研究,许多重要的问题得到了有效的解决,例如,逼真光照明模型的提出、纹理映射技术的突破及造型技术的发展等。到了 80 年代,图形学的理论开始从实验室研究走向市场,从而导致了大量商品化软件的推出,这些软件涵盖了许多应用领域,如建筑设计、工程 CAD、图形设计及动画制作等。在动画制作系统方面,早期的系统主要面向二维卡通动画设计为主,其出发点是利用形状插值技术和自动区域填色技术来完成全部或部分助理动画师的工作,从而极大地提高了卡通动画制作的效率。自 80 年代初开始,市场上先后推出了多个三维动画软件,使得计算机动画技术得到了全面发展。鉴于计算机智能技术的滞后,所有这些计算机动画系统均无法取代主动画师的作用。因而,计算机动画系统往往以用户为动画师,并以菜单驱动方式提供给用户一系列生成各种动画和视觉效果的工具,用户可组合利用这些工具来生成所需的运动和效果。尽管这些系统并非完美无缺,所提供的界面亦并不总是友好,有些动作需花费几个小时甚至几天才能完成,但所产生的视觉效果却令人难以忘怀,回味无穷。或许你会找出 20 世纪 80 年代计算机动画作品中存在的各种各样的毛病,但在 90 年代,我们已能生成许多以假乱真的影视特技。观众已经分辨不出哪些是计算机动画作品,哪些是模型制作的结果,这在著名的美国电影《侏罗纪公园》和《终结者 II》中得到了淋漓尽致的展现。

对计算机动画系统来说,最大的问题是如何使得两类具有完全不同知识结构的制作人员的知识相互融合,从而使系统具有更为友好的界面。一般来说,计算机动画系统均是由计算机高级专业人员设计而成的,这些人员具有很高的软件开发水平,但他们往往不拥有图形设计和动画制作所需的艺术修养。因而,在系统开发时,他们往往单纯地从技术的角度去设计,而不是从艺术的角度去考虑问题。反之,对设计人员,尽管他们缺乏应有的编程技巧,但他们有很强的艺术感觉,因而在操作动画系统时,有其自身的处理方式。这就导致了动画技术、界面设计与艺术需求的严重脱节,严重影响了系统的界面友好性。这一问题在前 20 年的高级三维动画软件中表现得非常明显。最近,由 Alias/Wavefront 公司推出的 Maya 三维动画软件在这方面有了重大突破。该系统在设计过程中,聘请了一大批富有经验的动画设计人员,程序设计人员充分考虑了这些艺术家的需求,使得 Maya 的界面变得非常友好。该软件已成为目前功能最为强大的动画软件之一。

总之,经过 30 余年的发展,计算机动画技术日臻成熟,但存在的问题仍然不少,有待今后不断改进。

1.2 计算机动画技术的应用

与传统卡通动画相比,计算机动画是一门相当年轻的新兴技术。目前,该技术已在许多应用领域证明了其无限的潜力。它不仅仅是建立幽默卡通的一种新技术,更重要的是该技术提供了一种模拟和观察三维世界运动变化的革命性方法。在计算机内存中构造虚拟世界既迷人又不可思议,而其概念又非常简单。

计算机动画得到广泛应用的原因之一是来自不同应用领域的用户所需的动画硬、软件基本相同,通常只需少量的修改。如公司商标、汽车引擎、分子模型及家具、建筑物等模型均可用动画系统的基本造型工具来构造,进而由动画技术和绘制技术来生成连续的序列画面。为说明动画系统的这种灵活性,本节将对计算机动画技术的应用领域作一个简单介绍。

1.2.1 电视业

计算机动画在电视业的初期应用主要是被用来制作栏目的片头。传统上,这种动画均采用二维卡通动画技术完成。今天,计算机喷绘系统、数字合成系统和二、三维计算机运动控制技术已成为大家熟悉的工具。

特别值得一提的是,近几年引起人们广泛注意的数字化技术已给电视业带来了一场革命性的变革,从而促进了计算机动画技术在该领域的深层次应用。鉴于电视图象的离散特性,现在我们可以将过去用录象带存贮的模拟信号图象转化为用计算机硬盘存贮的数字图象。这样,用户可以利用计算机动画技术对动画序列

画面进行无失真的操作,如翻滚、卷面或将三维虚拟景物无缝地合成到实拍画面中等。这种计算机生成图象与数字电视图象的合成给电视制作者提供了无限的创作空间。

对电视制作来说,实时性是至关重要的。这是由于在对图象进行特技处理时,制作人员要求系统对所得结果即时可见,以便提高制作效率。目前,已有许多这种电脑特技系统,其中应用最为广泛的是 Quantel 的绘画箱(paintbox)系统。该系统能够对获取的画面在几分钟内形成复杂的伪三维动画效果。新闻节目及许多即时栏目尤其得益于这种电子喷绘系统。

除此之外,计算机动画技术在电视教育中的应用亦日益广泛。由于动画技术的形象性,它已被用来解释复杂的自然现象:小到简单的牛顿定律,大到复杂的狭义相对论。

总之,尽管计算机动画在电视业中有着广泛应用,但该技术必须在花费和效率上与传统动画技术竞争。

1.2.2 工业界

计算机辅助设计始终被认为是计算机图形的一个主要应用领域。利用动画技术,设计者能够使虚拟模型运动起来,由此来检查只有制造过程结束后才能验证的一些模型特征,如运动机构的协调性、稳定性及干涉检查等,以使设计者及早发现设计上的缺陷。

在现实生活中,任何一个三维装配模型的零部件均可通过运动来发现彼此之间的相互物理关系,但这并不意味着所有的 CAD 系统均能够完成这一工作。传统的 CAD 系统只提供必需的设计工具来构造和观察虚拟物体,物体的运动也只局限于从不同角度来观察物体,它们并不提供物体旋转轴的确定、曲面间的接触、机构的连接和滑行机制等。显然,传统 CAD 系统并不能提供汽车发动机内部汽缸、活塞及火花室内的机构或流体的运动。尽管这种特定意义的物体运动与计算机动画技术的出发点有着很大的不同,但随着技术的发展,目前这种动画技术已逐渐加入到各个高级 CAD 系统中,最著名的有 Dassault 公司的 CATIA CAD/CAM 系统。

一般来说,动画技术在工业界的应用是千变万化的,由于应用目的不同,动画技术也各不相同,因而在实际使用中,读者必须根据特定行业设计特定的动画技术,而不能一味地采用固有的技术。只有这样,才能满足各行业的需要。

1.2.3 飞行模拟

计算机动画技术在飞行模拟器的设计中起着非常重要的作用。该技术主要用来实时生成具有真实感的周围环境图象,如机场、山脉和云彩等。此时,飞行员

驾驶舱的舷舱成为计算机屏幕,飞行员的飞行控制信息转化为数字信号直接输出到电脑程序,进而模拟飞机的各种飞行特征。飞行员可以模拟驾驶飞机进行起飞、着落、转身等操作。

飞行模拟器的核心是其中的实时图形生成器。为逼真模拟各种气候条件,该图形生成器必须利用真实感图形和动画技术实时生成云彩、烟雾、雨雪、各种灯光效果及其运动。由于这些光照效果的计算非常耗时,而机场模型又往往非常复杂,因而,问题的关键是如何实时生成画面。随着图形软、硬件技术的发展,这一问题已逐渐得到解决。

1.2.4 建筑业

以前,建筑师利用二维计算机图形技术来辅助绘制建筑平面图。今天,利用三维计算机动画技术,我们不仅可观察建筑物的内、外部结构,而且可实现对虚拟建筑场景的漫游。

动画技术在建筑业中的更深层应用是利用合成技术来实现环境评估。建筑师和有关人员可以利用它来评价建筑物对周围环境的整体影响。这对城市建设、环境保护以及避免造成灾难性的后果具有非常重要的意义。

1.2.5 广告娱乐业

计算机动画技术给广大广告和电影制作人员提供了充分发挥其想像力的机会,他们可以利用该技术生成平常难以尝试的创意。利用数码合成及摄像机定位技术,可以实现虚拟景物与实拍画面的无缝合成——观众难以区分画面中景物的真假。

尽管目前电脑动画技术生成的特技画面耗费惊人,但近几年还是出现了一些著名的大制作,如耗资巨大的电影《侏罗纪公园》和《终结者 II》中的精彩特技镜头。由于商品化动画软件各有优缺点,因而制作一些特技镜头往往需要同时使用多个软件。幸运的是,目前软件间的数据标准日益开放,这使它们之间的数据交换成为可能。另外,由于造型是一个非常耗时的过程,而三维激光扫描系统的推出,使模型技术和传统几何造型技术有了惊人的完美统一。传感技术的发展使得计算机生成人体各种动作变得非常容易,而且有效地保证了生成动作的逼真性。尽管纯电脑制作影片《玩具总动员》仍具有卡通特征,但在不久的将来,我们将有机会欣赏到纯电脑制作的真人般的表演。

在娱乐业方面,计算机动画技术逐渐进入三维游戏行业,这使游戏的图象质量及动作真实性均有了显著提高,但该技术目前还不能完全取代传统的二维卡通技术。