

动画模型 的编辑算法及应用

—— 雷开彬 著 ——



DONGHUAMOXING DE BIANJI SUANFA JI YINGYONG
DONGHUAMOXING DE BIANJI SUANFA JI YINGYONG
DONGHUAMOXING DE BIANJI SUANFA JI YINGYONG

DONGHUAMOXING DE BIANJI SUANFA JI YINGYONG
DONGHUAMOXING DE BIANJI SUANFA JI YINGYONG

DONGHUAMOXING DE BIANJI SUANFA JI YINGYONG

DONGHUAMOXING



西南交通大学出版社
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

动画模型的编辑算法及应用

雷开彬 著

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

动画模型的编辑算法及应用 / 雷开彬著. —成都: 西南交通大学出版社, 2008.7
ISBN 978-7-81104-547-5

I. 动… II. 雷… III. 动画—图形软件—软件设计
IV. TP391.41

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 095758 号

动画模型的编辑算法及应用

雷开彬 著

| | |
|-------|-------------------------------|
| 责任编辑 | 张宝华 |
| 封面设计 | 翼虎书装 |
| 出版发行 | 西南交通大学出版社 (成都二环路北一段 111 号) |
| 发行部电话 | 028-87600564 87600533 |
| 邮 编 | 510031 |
| 网 址 | http://press.swjtu.edu.cn |
| 印 刷 | 四川森林印务有限责任公司 |
| 成品尺寸 | 146 mm×208 mm |
| 印 张 | 7.687 5 |
| 字 数 | 212 千字 |
| 版 次 | 2008 年 7 月第 1 版 |
| 印 次 | 2008 年 7 月第 1 次印刷 |
| 书 号 | ISBN 978-7-81104-547-5 |
| 定 价 | 18.00 元 |

图书如有印装问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

内 容 提 要

计算机动画模型是动画制作过程中所使用的场景或角色物体的数字表示，动画模型的编辑是对模型按照某种需要进行的形状修改操作，其编辑技术与模型的表示有着紧密而内在的联系。本书针对计算机动画系统的造型子系统的典型编辑算法进行了论述，并对近年来出现的模型编辑新技术进行了分析与研究。内容主要包括参数样条及编辑技术、Bézier 曲线曲面编辑技术、NURBS 曲线曲面编辑技术、保刚性的形状插值技术、空间变形技术、Poisson 网格编辑技术和 Laplacian 曲面编辑技术。题材新颖，接触前沿，面向应用。

本书可作为计算机动画、计算机图形学、数字几何处理、工业产品造型等专业的研究生教材，也可作为相关领域高年级大学生和科研人员的参考书。

前 言

计算机动画是通过连续播放一系列的画，在视觉上造成一种图像连续变化的感觉，并实现赋予场景中的景物具有“生命”动感的效果。众所周知，传统的动画制作过程充满了大量繁琐而枯燥的中间帧绘画劳动。随着计算机软硬件系统的发展，特别是图形处理系统性能的快速提高，借用计算机来减轻绘画师的繁重劳动已成为现实。在计算机中要进行动画制作的自动化生产，必须要解决两个基本问题：一是如何构造故事情节中的角色和环境，二是如何产生符合自然或设计要求的动作序列。面对这两个问题的解决，无论是现在计算机的硬件或是软件算法都需要进一步的研究与提高。

首先，对于动画系统中的造型问题，它涉及模型的表示和模型的编辑。自然界中的万事万物、各形物体或场景，就目前而言，不存在统一的表示方法。在已有的各种数字化方法中，其表示法都是与具体的某类物体相关联。我们知道，物体的造型不是一次成功的，而是需要多次反复进行变形修改或编辑的。对三维物体而言，这种编辑尤其困难。事实上，对三维数字物体（角色）的编辑是模拟一个物体在自然界中的各种受力变形的过程、或是运动的姿态形状、或是想象中的形态外貌等。这种模拟是基于物理或自然的，因此具有多学科理论与知识的综合。本书首先对经典的曲线曲面模型表示方法进行介绍，重点讨论了参数样条、Bézier 曲线曲面、NURBS 曲线曲面表示的编辑技术和物体的约束变形技术，然后，研究了具有模拟自然特性的三维物体扫描模型（Mesh）的微分网格处理技术。

其次，计算机动画自动化生产过程中的中间帧插补问题，即产生符合自然或设计要求的动作序列仍是计算机动画制作中的难点问题。就现有的研究成果来看，对于该问题研究的关键点仍是集中在关键帧模型之间的顶点对应和路径插补问题上。目前的研究成果表

明，路径插补已有多种算法技术出现，其效果在一定程度上满足动画的要求。本书介绍的球面四元素插值、内在量插值、保刚性的形状插值、Poisson 网格处理等都是路径插补问题的解决。相对于路径插补问题，顶点对应问题就显得要困难得多，特别是人工干预很少的具有特征对齐的自动化对应就更难。但是，近年来也有不少的研究成果出现，读者可参考相关文献。

本书的特点是题材新颖、接触前沿、面向应用。选题大多是作者本人近年来的研究成果和该领域出现的热点技术，就是对传统方法的介绍也是重点突出在模型的控制与编辑算法的分析上。对所论述的主题始终秉持应用、实用和前沿这一宗旨。全书共分八章，第一章讨论了与计算机动画模型编辑相关的四个问题，即计算机动画发展史、计算机动画的研究内容、三维动画技术和计算机动画模型编辑算法的主要内容。第二章主要介绍了参数样条表示的基本特性，包括几何不变性、参数样条连续性和典型的 Hermite 参数样条的构造与编辑特性。第三章讨论了应用广泛、发展成熟的 Bézier 曲线曲面造型技术，它是造型方法的重要基础。这里主要从 Bézier 方法的几何直观定义及形状控制方法角度进行了研究。第四章论述了三个问题，即 B 样条曲线曲面的定义及编辑特性、均匀有理 B 样条的端点结构性质和 BC 均匀样条曲线曲面的构造。重点对进一步揭示 B 有理样条曲线的形状、权因子和控制顶点位置的内在关系的三次均匀有理 B 样条曲线的端点理论进行了研究，同时给出了 BC 均匀样条曲线曲面的构造的研究成果。第五章对近年来角色动画中模型插值研究的热点之一的保刚性的形状插值技术作了较深入的讨论：首先是较深入地研究了 2D 形状的内在量插值算法；其次，根据内在量插值思想，将其推广到坐标优化的插值算法，得到了适合空间开闭曲线插值的简单统一算法。第六章讨论了的空间变形技术，包括由 Barr 的整体与局部变形、Sederberg 的 FFD 方法、弧长轴变形方法、Scodef 变形方法和保刚性的变形技术。该章还介绍了自由变形技术的三个步骤，即用户交互设定代理模型，用户通过操纵代理模型来表达特定的编辑意图和根据变形后的代理模型以及原始模型的

参数化信息恢复出编辑后的原始模型，同时也研究了值得关注的局部刚性变换和整体优化重构的算法思想。第七、八两章讨论了最近几年发展起来的泊松网格模型编辑技术和拉普拉斯曲面编辑技术，重点讨论了基于泊松网格模型的编辑框架和分段线性曲线的泊松编辑框架与应用。对拉普拉斯曲面编辑技术讨论了三角网格模型的坐标表示和拉普拉斯坐标求解，模型的局部 Morphing 框架和曲面编辑算法，这些技术近年来受到众多该领域学者的关注。

本书得到四川省应用基础研究项目、国家民委科研项目、校级重点项目的资助，在此表示感谢。

由于时间仓促，水平有限，对某些文献理解不透，书中难免会出现错误和不足之处，敬请读者不吝指正。

作 者

2008 年 3 月

目 录

| | |
|-----------------------------------|----|
| 第 1 章 绪 论 | 1 |
| 1.1 计算机动画及发展简史 | 1 |
| 1.2 计算机动画的研究内容 | 4 |
| 1.3 三维动画技术 | 5 |
| 1.4 动画模型的数字几何处理 | 9 |
| 1.5 计算机动画模型简介 | 10 |
| 1.5.1 参数样条模型 | 11 |
| 1.5.2 体素构造表示法 | 11 |
| 1.5.3 多边形网格模型 | 11 |
| 1.5.4 细分网格模型 | 13 |
| 1.5.5 粒子系统 | 15 |
| 1.5.6 点模型 | 16 |
| 1.6 计算机动画模型编辑技术 | 18 |
| 1.7 小 结 | 21 |
| 第 2 章 参数样条及编辑技术 | 23 |
| 2.1 参数样条表示的特性 | 23 |
| 2.1.1 参数表示的几何不变性 | 24 |
| 2.1.2 连续性条件 | 27 |
| 2.1.3 多项式参数样条描述 | 29 |
| 2.2 Hermite 插值样条的局部控制 | 30 |
| 2.2.1 Hermite 插值样条 | 31 |
| 2.2.2 Cardinal 切矢编辑 | 33 |
| 2.2.3 Kochanek-Bartels 切矢编辑 | 34 |

| | |
|----------------------------------|-----------|
| 2.3 小结 | 36 |
| 第3章 Bézier 曲线曲面编辑技术 | 37 |
| 3.1 Bézier 曲线及编辑特性 | 37 |
| 3.1.1 Bézier 曲线的几何表示 | 37 |
| 3.1.2 Bézier 曲线的几何性质 | 39 |
| 3.1.3 Bézier 曲线的编辑特性 | 41 |
| 3.2 Bézier 曲面及编辑特性 | 44 |
| 3.2.1 Bézier 曲面的表示 | 44 |
| 3.2.2 Bézier 曲面的编辑特性 | 45 |
| 3.2.3 Bézier 曲面的拼接 | 46 |
| 3.3 小结 | 48 |
| 第4章 NURBS 曲线曲面编辑技术 | 49 |
| 4.1 B 样条曲线及编辑特性 | 50 |
| 4.1.1 B 样条基函数 | 50 |
| 4.1.2 B 样条曲线的编辑特性 | 54 |
| 4.1.3 均匀 B 样条曲线 | 58 |
| 4.1.4 三次均匀 B 样条曲线的插值算法 | 59 |
| 4.2 B 样条曲面及其插值 | 61 |
| 4.3 有理 B 样条曲线曲面及编辑特性 | 63 |
| 4.3.1 有理 B 样条曲线 | 63 |
| 4.3.2 有理 B 样条权因子对形状的影响 | 64 |
| 4.3.3 有理三次均匀 B 样条曲线的形状控制 | 66 |
| 4.3.4 有理 B 样条曲面 | 74 |
| 4.4 基于 de Boor-Cox 递推公式的 BC 样条方法 | 77 |
| 4.4.1 均匀 BC 样条基函数的定义及性质 | 78 |
| 4.4.2 均匀 BC 样条基函数的连续可微性 | 79 |
| 4.4.3 均匀 BC 样条基函数的设计实例 | 82 |

| | |
|-------------------------------|-----------|
| 4.4.4 均匀 BC 样条曲线的定义及性质 | 85 |
| 4.4.5 均匀 BC 样条曲线设计 | 86 |
| 4.4.6 均匀 BC 样条曲面 | 87 |
| 4.5 小 结 | 88 |
| 第 5 章 保刚性的形状插值技术 | 90 |
| 5.1 插值技术概述 | 90 |
| 5.1.1 2D 形状插值技术 | 91 |
| 5.1.2 三维物体的插值技术 | 95 |
| 5.2 空间四元素的球面插值 | 96 |
| 5.2.1 物体的朝向表示与插值技术 | 97 |
| 5.2.2 四元素的定义及性质 | 101 |
| 5.2.3 四元素的矩阵转换 | 104 |
| 5.2.4 单位四元数的球面线性插值 | 106 |
| 5.3 具有边界约束的内在量插值算法 | 108 |
| 5.3.1 内在量表示的形状插值 | 109 |
| 5.3.2 边界约束的插值算法 | 111 |
| 5.3.3 边界约束的相似变换 | 113 |
| 5.4 基于坐标优化的插值算法 | 115 |
| 5.4.1 坐标优化方程 | 115 |
| 5.4.2 非线性局部插值器 | 117 |
| 5.4.3 坐标优化的算法特性 | 117 |
| 5.4.4 空间曲线形状渐变 | 121 |
| 5.4.5 三维模型拼接算法 | 122 |
| 5.5 非线性保刚性的形状插值 | 123 |
| 5.5.1 保刚性的三角形渐变算法 | 123 |
| 5.5.2 三角剖分的顶点路径 | 125 |
| 5.5.3 2D 形状的同构剖分 | 128 |
| 5.6 基于物理的三角形动画渐变算法 | 130 |

| | |
|----------------------|------------|
| 5.6.1 物理模型插值算法 | 130 |
| 5.6.2 物理模型的动画特性 | 130 |
| 5.7 小结 | 132 |
| 第6章 空间变形技术 | 134 |
| 6.1 整体和局部变形方法 | 134 |
| 6.1.1 模型变形及法向量的计算 | 135 |
| 6.1.2 变形设计 | 137 |
| 6.1.3 局部变形方法 | 140 |
| 6.2 自由变形 (FFD) 技术 | 141 |
| 6.2.1 自由变形方法 FFD | 142 |
| 6.2.2 直接操纵的 FFD 变形方法 | 145 |
| 6.3 基于弧长的轴变形方法 | 150 |
| 6.3.1 旋转最小标架 | 150 |
| 6.3.2 参数曲线离散及查找表 | 151 |
| 6.3.3 基于弧长的轴变形方法 | 153 |
| 6.4 Scodef 变形方法 | 156 |
| 6.4.1 Scodef 变形模型 | 157 |
| 6.4.2 Scodef 变形模型的性质 | 160 |
| 6.4.3 Scodef 的进一步扩展 | 162 |
| 6.5 保刚性的变形操作 | 163 |
| 6.5.1 操作概述 | 164 |
| 6.5.2 保刚性的变形算法概述 | 165 |
| 6.5.3 变形尺度函数的构造 | 166 |
| 6.5.4 三角形尺度调整 | 168 |
| 6.5.5 重构拟合三角形 | 169 |
| 6.5.6 算法步骤 | 171 |
| 6.5.7 算法应用 | 171 |
| 6.6 小结 | 173 |

| | |
|--------------------------------|-----|
| 第 7 章 Poisson 网格编辑技术 | 174 |
| 7.1 网格数据与离散微分算子 | 174 |
| 7.1.1 网格数据的基本定义 | 174 |
| 7.1.2 离散微分算子 | 178 |
| 7.2 Poisson 网格编辑框架 | 180 |
| 7.2.1 框架概述 | 180 |
| 7.2.2 Poisson 网格重建 | 182 |
| 7.2.3 网格重建的唯一性 | 183 |
| 7.3 Poisson 网格编辑算法 | 185 |
| 7.3.1 基于边界操作的网格变形 | 185 |
| 7.3.2 网格融合 | 190 |
| 7.3.3 网格形状插值 | 192 |
| 7.4 Poisson 曲线形状渐变 | 194 |
| 7.4.1 分段线性曲线的 Poisson 方程 | 194 |
| 7.4.2 曲线约束变形算法框架 | 196 |
| 7.4.3 曲线形状渐变实验分析 | 198 |
| 7.5 小 结 | 201 |
| 第 8 章 Laplacian 曲面编辑技术 | 203 |
| 8.1 网格的微分表示 | 203 |
| 8.1.1 网格的 Laplacian 表示 | 204 |
| 8.1.2 绝对坐标的求解 | 205 |
| 8.2 局部网格 Morphing | 207 |
| 8.2.1 局部网格 Morphing 框架 | 207 |
| 8.2.2 空间非均匀变换描述 | 207 |
| 8.2.3 Laplacian 局部变形 | 208 |
| 8.3 Laplacian 网络的交互编辑 | 210 |
| 8.3.1 保网格细节变换 | 210 |

| | |
|---------------------------|-----|
| 8.3.2 法矢估计..... | 213 |
| 8.3.3 Laplacian 坐标编辑..... | 214 |
| 8.4 Laplacian 曲面编辑..... | 215 |
| 8.4.1 变换的最小二乘拟合..... | 216 |
| 8.4.2 网格编辑..... | 219 |
| 8.4.3 网格细节迁移..... | 220 |
| 8.5 小结..... | 222 |
| 参考文献..... | 223 |

第 1 章

绪 论

1.1 计算机动画及发展简史

计算机动画是指通过连续播放一系列的画而，在视觉上造成一种图像连续变化的感觉，使场景中的景物具有“生命”动感效果。其基本原理是利用人类“视觉暂留”的特性，潜意识地将连续出现的序列画面组合起来，形成一种具有连续、无闪烁和运动感的视觉效果。也就是说，人的眼睛在看到一副画面或一个物体后，由于视网膜表面分布着大量的光接受细胞，它们可接受光的能量并形成视觉图案，而这种图案在 $1/24$ 秒内不会消失，从而形成视觉暂留。人们利用这一原理，在一副画面还未消失之前，播出下一副画面，只要这种播放的频率不低于每秒 24 副画面，视觉上就会出现不停顿的连续动感的运动图像。如果播放频率更高（比如每秒 48 帧或 72 帧），动画就会达到更加自然稳定的运动画面。在我国，电视采用 PAL 制式每秒 25 帧，或 NSTC 制式每秒 30 帧，电影是每秒 24 帧。

计算机动画技术是综合利用了计算机科学、艺术、数学、物理学、生命科学和其他相关学科的知识来生成绚丽多彩的连续逼真画面，给人类提供了一个充分发挥个人想象和艺术创造才能的无限空间。在《魔鬼终结者》、《侏罗纪公园》、《玩具总动员》、《泰坦尼克号》、《恐龙》等优秀电影中，我们可以充分领略到计算机动画的高

超魅力和图形学新技术所带来的艺术享受及动画产业的发展。在传统动画的制作过程中,导演首先要将剧本分成一个个分镜头;然后由高级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状绘制出从一个关键帧形状到下一个关键帧形状的自然过渡,并完成填色及合成工作,再依次拍摄这一帧帧连续画面,从而得到一段动画片段。在这些过程中,由于大量枯燥的工作集中在助理动画师身上,而且要求动画师有丰富的生活经验和高超的绘画技艺,因而,一个自然的想法就是借助计算机来减轻助理动画师的工作,从而提高动画的制作效率。因此,可以说计算机动画技术的产生是水到渠成。

1946年,世界上第一台真正意义上的电子计算机 ENLAC 诞生后,不但改变了人们的传统计算方式,把人们从烦琐的计算中解脱出来,而且实现了人类理论上可以计算而实际无法完成的计算工作。1950年,在美国麻省理工学院(MIT)诞生的旋风 I 号(Whirlwind I)计算机及其显示器,开辟了用以满足人们视觉并需要研究和应用的计算机新时代。而计算机动画也得益于新型显示设备和快速图形处理器的发展而成为当今 IT 业的佼佼者,其发展阶段可分为初创期、发展期、成熟期和生长期[ZHEN07]。

20世纪60年代是计算机动画发展的初创时期,第一个开始这一领域研究的是,1962年麻省理工学院的物理博士 Ivan Sutherland 编写的一个名为“写生簿”的程序。他提出了人机交互图形系统的概念,从而奠定了现代计算机图形学的基础,同时也表明用数字来描绘图像这一新技术时代的到来。1964年,贝尔实验室的肯克劳顿(Knowlton, K)第一次用 IBM7094 开发了 BEELIF 语言。该语言可以直接处理 8 个灰度等级、252×184 像素的矩阵,它通过发射电子信号波导致图像畸变,并使用正弦曲线、平行或垂直变形来完成计算机动画。1969年,同样是在麻省理工学院,Ronld Baecker 博士发表了图形驱动的动画系统 GENESYS,该系统能对动态行为进行描述。然而,这一时期的计算机动画比较粗糙,但理论发展却十分迅速,并为下一阶段的发展奠定了坚实的基础。

20世纪70年代是计算机动画的发展期。在这一时期,动画创作工具,如跟踪球、数字化仪的出现为人机交互提供了方便快捷的手段,特别是个人计算机的出现,使更多的艺术家投入到电脑动画的创作中来。一些图形算法,如分形、真实感图形等也从理论上发展成为具体的产品,特别是图形系统在电器、机械和建筑等工业CAD的大量应用,极大地推动了计算机动画的发展,并确立了三维图形的算法基础。1971年,宾夕法尼亚大学开发了一个2D交互动画系统(Animator)。同年,加拿大国家研究院的Burtnyk和Wein发表了有关主图动画系统的模型论文,首次用计算机实现主图(关键帧)之间的中间帧图形的计算原理,即中间线性帧插值算法。1978年,卢卡斯的《星球大战》的出现,致使逼真的宇宙飞船模型能在太空遨游,从而极大地冲击了传统的电影制作技术。

20世纪80年代是计算机动画的成熟期。这一时期,图形图像技术进入普及阶段,此时的个人电脑已能担当起图形图像的处理任务。1983年,Edwin Catmull开发了3D主图动画控制系统BBOP,此系统包含了反混淆技术、光照模型和纹理等功能。在这一时期,具有代表性的动画影视较多,如《小克鲁索》(1986),《Don't Touch》(1989)等,而具有代表性的算法技术有光照模型的辐射度方法、运动动态技术、样条模型开发、人物分级动画与逆向运动学等多种现代计算机动画技术,此时,也出现了三维动画软件系统。

20世纪90年代至今是计算机动画的生产期,这一时期也是计算机动画制作走向规模化的时期。就计算机动画制作本身而言,制作过程的自动化程度越来越高,而且艺术家也完全参与其中。另一方面,场景中物体、角色的运动或变形技术在现代各学科理论的支撑下显得自然逼真。该时期的动画系统已能制作出以假乱真的影视特技,如在《侏罗纪公园》、《终结者Ⅱ》等电影中都得到了淋漓尽致的展现,观众已难以区分哪些是计算机生成的画面,哪些是模型制作的结果。如今计算机动画已极大地满足了人们的视觉冲击和享受,同时也极大地推动了计算机动画的蓬勃发展和市场需求。

1.2 计算机动画的研究内容

从技术的角度讲，计算机动画主要研究运动控制以及与动画有关的造型、绘制、合成等技术。计算机动画技术是计算机图形学发展的重要成果，它是传统静态图形技术向实时图形技术过渡的桥梁，其研究内容涉及计算机图形学的各个领域。一般来说，一个完整的计算机动画系统应包含以下五个模块系统[BA000]：

- (1) 文件及系统管理模块；
- (2) 造型模块；
- (3) 动画模块；
- (4) 绘制模块；
- (5) 后期合成模块。

从动画研制的技术来说，后四个模块是计算机动画研究的主要内容。当然，首先应该是计算机动画技术本身，即如何生成物体的各种运动和变化。计算机动画技术的研究在近 20 年得到了迅速发展，各种具有代表性的软件系统得到了广泛应用。例如，在 20 世纪 80 年代中期，wavefront 和 explore 等专用动画软件的推出使得艺术家们能够方便地进行动画制作。但是由于计算速度的影响，这些软件都必须运行在工作站上。其中值得一提的是加拿大多伦多 Alias 公司开发的 alias 和蒙特利尔 Softimage 公司开发的 softimage 动画软件系统，它们分别以其强大的造型功能和方便的控制手段成为其中的佼佼者。随着微机技术的不断发展，90 年代初，美国 Autodesk 公司推出了三维动画软件 3Dstudio。它具有三维建模、真实感绘制、动画处理和后期制作等功能，由于其硬件配置要求较低，因此比较适合我国国情。90 年代中后期，Autodesk 公司在 3DStudio 的基础上推出了 3DMAX，Alias 公司合并 Wavefront 后推出了 MAYA (SGI 版和 NT 版)，它们与 softimage 一起成为目前使用最广泛的动画制作软件。在这些动画软件的造型模块、动画模块和绘制模块中都集成了计算机图形学和动画技术的最新发展成果。