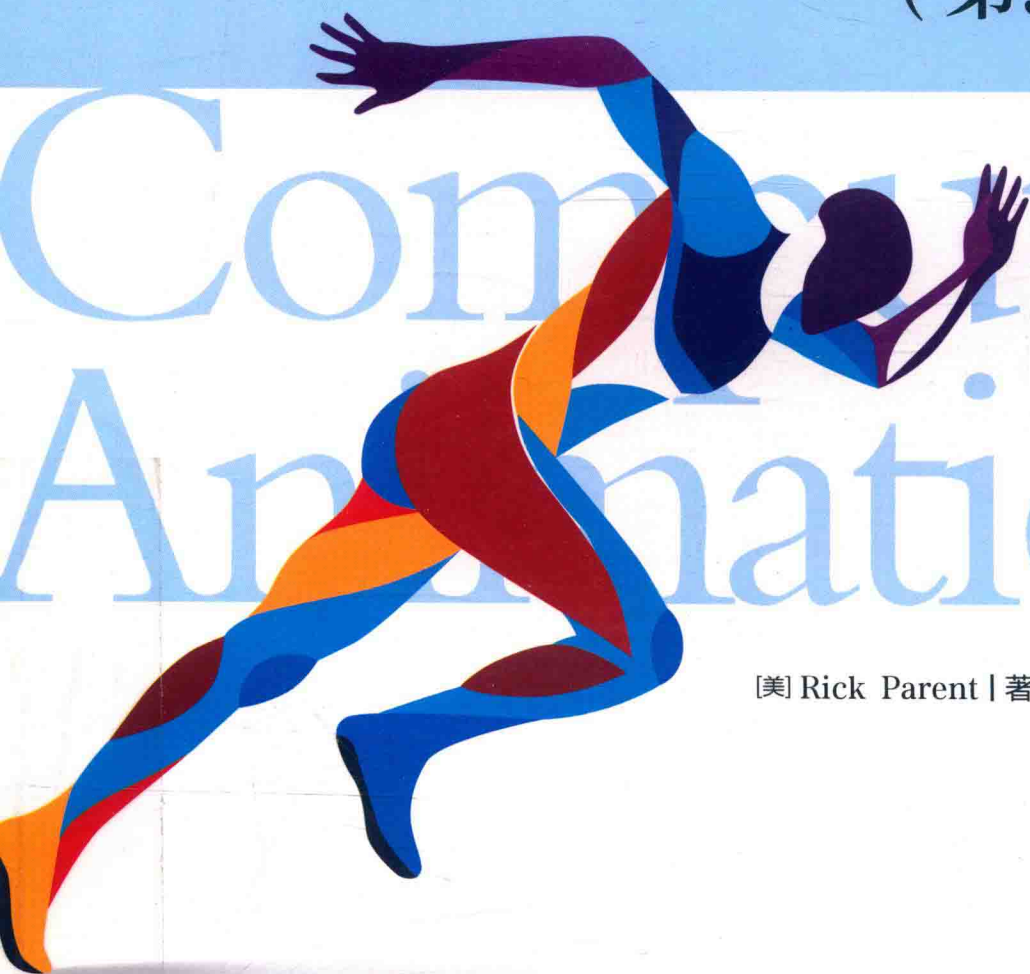




Computer Animation Algorithms and Techniques, 3rd Edition

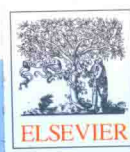
计算机动画 算法与技术

(第3版)



[美] Rick Parent | 著 刘 玮 | 译

清华大学出版社

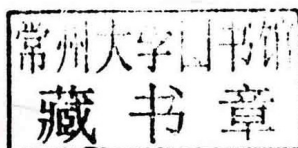


计算机动画算法与技术

(第3版)

[美] Rick Parent 著

刘 祎 译



清华大学出版社

北 京

内 容 简 介

本书详细阐述了与计算机动画算法相关的高效解决方案及相应的数据结构和算法,主要包括技术背景知识、插值技术、插值动画技术、运动链接、运动捕捉、物理动画、流体、人物角色的建模和动画、面部动画、建模行为以及特殊动画模型等内容。此外,本书还提供了相应的算法、代码以及伪代码,以帮助读者进一步理解相关方案的实现过程。

本书适合作为高等院校计算机及相关专业的教材和教学参考书,也可作为相关开发人员的自学教材和参考手册。

Computer Animation Algorithms and Techniques, 3e

Rick Parent

ISBN: 9780124158429

Copyright © 2012 by Elsevier. All rights reserved.

Authorized Simplified Chinese translation edition published by Elsevier (Singapore) Pte Ltd Press and Tsinghua University Press.

Copyright © 2018 by Elsevier (Singapore) Pte Ltd and Tsinghua University Press. All rights reserved.

Published in China by Tsinghua University Press under special arrangement with Elsevier (Singapore) Pte Ltd..

This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong SAR and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书简体中文版由 Elsevier (Singapore) Pte Ltd. 授予清华大学出版社在中国大陆地区(不包括香港、澳门特别行政区以及台湾地区)出版与发行。未经许可之出口,视为违反著作权法,将受法律之制裁。

北京市版权局著作权合同登记号 图字: 01-2013-6749

本书封底贴有 Elsevier 防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话: 010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

计算机动画算法与技术/(美)里克·帕伦特著;刘祎译. —3版. —北京:清华大学出版社,2018

(书名原文: Computer Animation, 3rd Edition Algorithms and Techniques)

ISBN 978-7-302-48580-3

I. ①计… II. ①里… ②刘… III. ①计算机动画 IV. ①TP391.414

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第249861号

责任编辑: 赵洛育

封面设计: 刘超

版式设计: 魏远

责任校对: 马子杰

责任印制: 李红英

出版发行: 清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址: 北京清华大学学研大厦A座 邮 编: 100084

社总机: 010-62770175 邮 购: 010-62786544

投稿与读者服务: 010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈: 010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印装者: 三河市金元印装有限公司

经 销: 全国新华书店

开 本: 185mm×260mm 印 张: 29.5 字 数: 716千字

版 次: 2012年10月第1版 2018年1月第3版 印 次: 2018年1月第1次印刷

印 数: 1~4000

定 价: 119.00元

产品编号: 050637-01

译者序

计算机图形技术以及计算机动画在视觉效果和动画制作方面曾引发了重大的技术变革，而且这一前进步伐仍未停止，数字技术进一步拓展了广大观众群体。由于业内人士对视觉效果的不追求，各家公司均对其作品中的图形效果提出了更高的要求。当前，建模、渲染以及动画技术日趋成熟，硬件运算速度不断提升而其价格却不断下降，高质量的计算机图形效果广泛地应用于电影制作中，计算机图形方案使得外星生物看上去更加栩栩如生。

有人曾将游戏称为继绘画、雕刻、建筑、音乐、文学（诗歌）、舞蹈、戏剧、电影之后人类历史上的第 9 种艺术。其中，计算机动画饰演了重要的角色。同时，计算机游戏软件的开发和一般软件开发也存在着较大的差异。因此，这也向程序设计人员提出了更高的要求：不仅需要掌握程序设计技巧和软件工程方法，还需要有坚实的专业领域知识。

针对这一问题，本书详细阐述了与计算机动画算法相关的高效解决方案，涵盖了丰富的内容，主要包括技术背景知识、插值技术、插值动画技术、运动链接、运动捕捉、物理动画、流体、人物角色的建模和动画、面部动画、建模行为以及特殊动画模型等。值得一提的是，本书并非一本纯理论书籍，除了对相关内容进行全面、系统的讲解以外，其设计思想、数据结构和算法均辅以对应的代码示例，以帮助读者进一步理解计算方案的实现过程。

在本书的翻译过程中，除刘伟之外，郭志杰、白永丽、赵洪玉、米玥、潘冰玉、李强、皮雄飞、史云龙、王巍、孙年果、程聪、朱利平、王晓晓、解宝香、李保金、王梅、林芮、刘鹤、张骞、张博、王烈征、李垚、张颖、张弢、刘君、李强、沈旻等人也参与了部分翻译工作，在此一并表示感谢。

由于译者水平有限，难免有疏漏和不妥之处，恳请广大读者批评指正。

译者

前言

总述

针对定义和生成图形对象，即计算机动画，本书主要讲述对应的计算机算法以及程序设计技术，且集中讲解三维（3D）领域中的计算机动画内容。因此，本书适用于计算机科学与技术方向的高年级本科生以及研究生。而对于那些期望学习计算机动画程序设计的程序员、使用软件工具生成计算机动画（并尝试理解动画制作软件中的底层计算问题）的制作人员，本书也将大有裨益。

本书的出版应是意料之中的事情——近年来，计算机动画获得了长足的发展，且广泛地出现于科研领域、学术领域，并带来了一定的就业机会，甚至一些人还将其视为一项终生爱好。

目前，影片大多采用数字方式存储，并引入了数字特效（通常称作计算机图像合成，简称为 CGI）。来自互联网电影数据库（网址为 www.imdb.com）2007 年 6 月的一份资料显示，前 10 名的美国影片（数据源于北美电影票房排行榜）均广泛地采用了 CGI 技术。

不难发现，计算机动画影片已具有相当的票房号召力，根据不完全统计，每 5 部上映电影中就有 1 部为计算机动画电影。2001—2006 年，数字图像技术领域出现了 27 位“科技成就奖”与“科学和工程奖”获得者。每年，计算机动画还为游戏产业创造了不低于 70 亿美金的收益。当前，功能强大的动画软件、低廉的 CPU 价格以及高存储量的家庭数字视频录像设备均使得桌面级计算机动画成为可能。大多数教育部门（如计算机科学系）均开设了与计算机动画相关的课程（以及相关的艺术课程，进而培养数字艺术家熟练地使用现有的计算机动画软件）。在计算机动画算法方面，学术会议以及相关期刊也记录了业界的发展现况。

本书对于实际操作过程中的相关问题均有所描述，并提供了可行性技术以及相对直观的实现方案。除了某些研究方向之外，本书尽量避免纯理论方式的讨论。本书中的部分示例程序为完整的可执行代码，此类代码采用 C 语言编写，复制、编译以及运行之后，即可生成算法结果；其他程序设计示例则采用类 C 伪代码加以编写，并可在适当的时候转换为可执行工作代码。这里，采用 C 语言编写代码的主要原因是，该语言包含了其他语言（如 C++ 语言和 Java 语言）的基础特性，并可彰显算法的逐步操作过程。本书附录包含了与此相关的基础内容，初学者可获取其中的有用内容以及实现过程中的特定算法。

本书并不打算详细介绍当今流行的动画软件包的使用方法（当然，也不排除针对某一类特定技术讨论软件的使用，这将有助于深入理解底层计算过程），也不会具体阐述计算机动画理论、计算机动画美学知识、动画设计过程中的美学问题、动画作品制作过程中的细

节问题以及计算机辅助动画（此类问题是指传统手绘动画的计算机化操作，多数时候，该问题包含一套自身的规则集，参见结尾处参考文献 1、2），而是主要讨论全三维计算机动画及其算法技术，动画制作人员和程序员可藉此以有趣的方式移动对象。尽管本书重点阐述 3D 技术，但 2D 技术依然十分重要。

计算机动画程序设计的基本目标是选择适当的技术和设计工具，以使动画设计人员表达丰富的细节，进而确定期望的内容；同时，相关技术和工具还应具备强大的功能，以使动画设计人员从枯燥的细节设定中解脱出来。然而，针对每一位动画设计人员、每一部动画作品，甚至是一部动画作品中的各个场景，通常不存在一类全功能的软件工具。这里，特定的动画工具往往取决于期望中的制作效果以及制作人员的控制过程。根据不同的模拟内容，动画艺术作品常需要使用不同的软件工具，因此，各类处理方案也层出不穷。

本书组织方式

第 1 章综合探讨了与计算机动画相关的问题，包括感知、手绘动画技术发展史、动画作品的测算方式以及计算机动画发展简史，相关内容提供了动画艺术与制作的广阔视角。

第 2 章讲述了必要的背景知识以及与动画相关的计算机图形学内容，并对计算机图形学中的计算问题进行了回顾，为后续学习打下坚实的基础，其中包括对渲染管线的回顾以及对转换顺序的讨论，以降低一系列计算所产生的舍入误差。另外，本章还讲解了基于方向表达的四元数形式。如果读者具有丰富的计算机图形学知识，则可跳过相关知识点，甚至整章内容。

第 3 章和第 4 章重点介绍插值技术。其中，第 3 章介绍与插值技术相关的基础知识，包括时间-空间曲线、曲线的弧长参数化操作以及曲线上的速度控制，随后还讨论了基于四元数的方向插值计算，且各类方案均与路径结合使用。第 4 章阐述了基于插值方案的动画技术，包括关键帧插值、动画语言以及形状插值。

第 5 章和第 6 章主要涉及关节型角色的动力学控制问题。其中，第 5 章讨论链接附肢的动力学方案，且同时涉及正向动力学和逆向动力学，并对正向动力学专门加以介绍。第 6 章讨论与运动捕捉（mocap）相关的基础内容，包括标记的处理方式以及运动捕捉结果数据的调校过程。

第 7 章和第 8 章讨论与动画相关的、真实世界的建模处理过程。其中，第 7 章探讨基于物理的动画、弹簧-阻尼系统、粒子系统、刚体动力学以及强制型约束条件。第 8 章介绍流体建模和动画技术，且分别论述了流体宏观特征处理模型以及计算流体动力学。

第 9~11 章讨论人类和其他动物的动画行为。其中，第 9 章主要介绍角色动画，包括建模操作、抵达行为、行走行为、布料以及头发。第 10 章则探讨面部动画，包括面部建模、表情以及口型动画。第 11 章讨论行为动画，包括群集行为、捕食者模型以及群体行为。

第 12 章阐述了某些特定模型，包括隐式表面、L 系统以及表面细分操作。

附录 A 展示了与计算机动画相关的、图像生成过程中所涉及的渲染问题，如双缓冲机制、合成操作、运动模糊以及阴影效果。这里，假设读者已了解帧缓冲区、z 缓冲显示算法以及抗锯齿操作等内容。

附录 B 讲述了原理型知识点, 包括插值计算和逼近技术、向量代数和矩阵、四元数演示代码、物理学第一定律、数值技术以及电影、视频、图像格式属性。

本书网站提供了相关的图像、示例代码以及角色, 其网址为 textbooks.elsevier.com/9780125320009。

关于作者

Rick Parent 现任俄亥俄州立大学 (OSU) 计算机科学与工程系教授一职。在学生时期, Rick 就开始在俄亥俄州立大学的计算机图形学研发中心 (CGRG) 工作, 并接受 Charles Csuri 的悉心指导。1977 年, 他获得计算机和信息科学 (CIS) 博士学位, 主攻方向为人工智能。在随后的 3 年中, 他以助理研究员的身份工作于 CGRG, 并逐步晋升为副主管。1980 年, 他与其他人共同创建了 The Computer Animation Company 并担任主席一职。1985 年, 他再次加入俄亥俄州立大学的 CIS 系 (现称为计算机科学与工程系)。Rick 的研究兴趣涉及计算机动画的方方面面, 但主攻方向为角色动画。目前, Rick 的研究课题包括面部动画以及通过模型技术跟踪视频中的人物角色。

致谢

本书的出版得到了多方人士的鼎力支持。这里, 首先要感谢我的妻子 Arlene, 她的奉献精神使得本书得以如期出版。作为本书的第一位读者, 在她的帮助下, 本书的可读性获得了极大的提升。

总的来说, 感谢那些我有幸认识以及共事多年的学生们, 他们对这个领域的共同兴趣、知识以及对这个领域的热情也使我受益匪浅, 在此也向 Doug Roble、John Chadwick、Dave Haumann、Dave Ebert、Matt Lewis、Karan Singh、Steve May、James Hahn、Ferdinand Scheepers、Dave Miller、Beth Hofer、Madhavi Muppala、Domin Lee、Kevin Rogers、Brent Watkins、Brad Winemiller、Meg Geroch、Lawson Wade、Arun Somasundaram、Scott King、Scott (Slim) Whitman 表示感谢 (如有遗漏敬请原谅)。

我还要感谢那些多年来为本书提供反馈意见 (无论是好是坏) 的读者, 特别是科罗拉多州立大学的 Philip Schlup 博士、卡尔加里大学的 Brian Wyvill 博士, 以及华沙大学的 Przemyslaw Kiciak 博士。

另外, 这里还要感谢俄亥俄州立大学计算机科学与工程系 (Xiaodong Zhang)、艺术与设计高级计算中心 (Maria Palazzi) 以及 Morgan Kaufmann 出版社的全体工作人员。

参考文献

1. All Time Grossing Movies. In: The Internet Movie Database (IMDB). IMDb.com, Inc

2012; <http://www.imdb.com/boxoffice/alltimegross>; 2012; Web. 26 March 2012.

2. *Scientific and Technical Awards*. In: *Academy of Motion Picture Arts and Sciences*. 2012; <http://www.oscars.org/awards/scitech/index.html>; 2012; Web. 26 March 2012.

3. *Industry facts*. In: *The Entertainment Software Association (ESA)*. 2012; <http://www.theesa.com/facts/index.asp>; 2012; Web. 26 March 2012.

4. Catmull E. The Problems of Computer-Assisted Animation. In: 1978; 348-353. *Computer Graphics*. vol. 12(3). August Atlanta, Ga.;

5. Levoy M. A Color Animation System Based on the Multiplane Technique. In: George J, ed. July 1977; 65-71. *Computer Graphics*. vol 11(2). San Jose, Calif.

目 录

第 1 章 概述.....	1
1.1 运动感知.....	2
1.2 动画发展简史.....	3
1.2.1 早期设备.....	4
1.2.2 早期传统动画.....	5
1.2.3 迪士尼.....	7
1.2.4 其他技术.....	8
1.2.5 其他动画媒介.....	8
1.3 动画制作.....	8
1.3.1 动画原理.....	11
1.3.2 电影制作原理.....	12
1.3.3 声音.....	14
1.4 计算机动画制作.....	15
1.4.1 计算机动画制作任务.....	16
1.4.2 数字编辑.....	17
1.4.3 数字视频.....	20
1.4.4 数字音频.....	20
1.5 计算机动画简史.....	21
1.5.1 早期行为（1980 年之前）.....	21
1.5.2 中期阶段（20 世纪 80 年代）.....	24
1.5.3 新纪元（20 世纪 80 年代以后）.....	25
1.6 本章小结.....	29
参考文献.....	29
第 2 章 技术背景知识.....	33
2.1 空间与转换.....	33
2.1.1 显示管线.....	34
2.1.2 齐次坐标和转换矩阵.....	38
2.1.3 复合转换：转换矩阵的累积操作.....	39
2.1.4 基本的转换操作.....	39
2.1.5 描述任意方向.....	41

2.1.6	从矩阵中获取转换操作	44
2.1.7	显示管线中的转换描述	44
2.1.8	误差	46
2.2	方向表达	49
2.2.1	定角表达	50
2.2.2	欧拉角表达	51
2.2.3	轴角表达	52
2.2.4	四元数表达	53
2.2.5	指数映射表达	55
2.3	本章小结	55
	参考文献	55
第3章	插值技术	57
3.1	插值计算	57
3.1.1	生成函数	57
3.1.2	综述	60
3.2	曲线顶点的移动控制	60
3.2.1	计算弧长	61
3.2.2	速度控制	73
3.2.3	易入/易出	74
3.2.4	通用距离-时间函数	80
3.2.5	匹配于位置-时间对的曲线	82
3.3	方向插值	83
3.4	与路径协同工作	87
3.4.1	路径移动	87
3.4.2	基于路径的方向	88
3.4.3	基于路径平滑操作	91
3.4.4	沿表面确定路径	96
3.4.5	路径计算	97
3.4.6	综述	98
3.5	本章小结	98
	参考文献	98
第4章	插值动画技术	101
4.1	关键帧系统	101
4.2	动画语言	104
4.2.1	面向设计人员的动画语言	105
4.2.2	基于动画设计的全功能程序语言	106

4.2.3	关联变量.....	106
4.2.4	图形语言.....	107
4.2.5	基于角色的动画语言.....	107
4.3	对象的变形操作.....	108
4.3.1	拾取和拖曳.....	108
4.3.2	嵌入空间的变形.....	110
4.4	三维形状插值方案.....	120
4.4.1	匹配拓扑结构.....	121
4.4.2	星形多面体.....	122
4.4.3	轴向切面.....	123
4.4.4	球体映射.....	125
4.4.5	递归细分.....	128
4.5	变形效果(二维).....	130
4.5.1	坐标网格方案.....	130
4.5.2	特征变形.....	135
4.6	本章小结.....	140
	参考文献.....	140
第5章	运动链接.....	143
5.1	层次结构建模.....	144
5.1.1	基于层次建模的数据结构.....	145
5.1.2	局部坐标框架.....	149
5.2	前向动力学.....	150
5.3	逆向动力学.....	151
5.3.1	通过解析法求解简单系统.....	152
5.3.2	Jacobian 方案.....	153
5.3.3	逆向动力学的数值方案.....	157
5.3.4	综述.....	163
5.4	本章小结.....	163
	参考文献.....	163
第6章	运动捕捉.....	165
6.1	运动捕捉技术.....	165
6.2	图像处理.....	166
6.3	相机校正.....	168
6.4	三维位置重构.....	169
6.4.1	多标记.....	170
6.4.2	多相机.....	171

6.5	骨骼匹配.....	171
6.6	从运动捕捉系统中输出内容.....	172
6.7	操控运动捕捉数据.....	174
6.7.1	信号处理.....	174
6.7.2	运动重定位.....	174
6.7.3	运动组合.....	175
6.8	本章小结.....	175
	参考文献.....	176
第7章	物理动画.....	177
7.1	基本物理学知识.....	177
7.2	弹性动画示例.....	180
7.2.1	弹性对象.....	180
7.2.2	虚拟弹簧.....	182
7.3	粒子系统.....	183
7.3.1	生成粒子.....	183
7.3.2	粒子属性.....	184
7.3.3	粒子消亡.....	184
7.3.4	粒子动画.....	184
7.3.5	粒子渲染.....	185
7.3.6	粒子系统表达.....	185
7.3.7	粒子受力状态.....	186
7.3.8	粒子生命周期.....	186
7.4	刚体模拟.....	186
7.4.1	自由落体.....	187
7.4.2	碰撞体.....	195
7.4.3	基于链接层次结构的动力学.....	206
7.5	布料.....	208
7.5.1	褶皱的直接建模.....	209
7.5.2	物理建模.....	212
7.6	软约束条件和硬约束条件.....	215
7.6.1	能量最小化.....	216
7.6.2	空间-时间约束条件.....	218
7.7	本章小结.....	220
	参考文献.....	220
第8章	流体：液体和气体.....	223
8.1	特定流体模型.....	223

8.1.1	水流模型	223
8.1.2	云彩模型和动画	232
8.1.3	火焰建模和动画	237
8.1.4	综述	239
8.2	计算流体动力学	239
8.2.1	流体建模的通用解决方案	240
8.2.2	CFD 方程	241
8.2.3	网格方案	244
8.2.4	包含均匀粒子流体动力学的粒子方案	245
8.3	本章小结	247
	参考文献	248
第 9 章	人物角色的建模和动画	251
9.1	虚拟人物表现方式	251
9.1.1	躯体几何体的表达方式	252
9.1.2	几何体数据采集	253
9.1.3	几何体变形	254
9.1.4	表面细节	254
9.1.5	人物角色建模过程中的层次方案	255
9.2	搜索和抓取行为	258
9.2.1	手臂建模	259
9.2.2	肩部关节	261
9.2.3	手部	261
9.2.4	协调的运动行为	263
9.2.5	回避障碍物	263
9.2.6	受力状态	264
9.3	行走效果	265
9.3.1	运动机制	266
9.3.2	行进过程中的动力学	269
9.3.3	基于动力学的真实运动行为	272
9.3.4	前向动力学控制	273
9.3.5	综述	273
9.4	覆盖特征	274
9.4.1	布料和服装	274
9.4.2	头发	274
9.5	本章小结	276
	参考文献	277

第 10 章 面部动画	283
10.1 面部结构	283
10.1.1 解剖学结构	283
10.1.2 面部行为编码系统	285
10.2 面部模型	286
10.2.1 创建连续的表面模型	287
10.2.2 纹理	292
10.3 脸部的动画效果	293
10.3.1 参数化模型	293
10.3.2 弯曲形状	294
10.3.3 肌肉模型	295
10.3.4 面部表情	297
10.3.5 综述	298
10.4 口型动画	298
10.4.1 语音发声	298
10.4.2 音素	299
10.4.3 协同发音	300
10.4.4 韵律学	301
10.5 本章小结	301
参考文献	301
第 11 章 建模行为	305
11.1 原始行为	307
11.1.1 群集行为	307
11.1.2 捕食行为	316
11.2 环境认知	316
11.2.1 视觉	317
11.2.2 记忆	318
11.3 智能行为建模	318
11.3.1 自主行为	319
11.3.2 表达方式和姿态	320
11.3.3 个性化建模：个性和情感状态	321
11.4 群体管理	322
11.4.1 群体行为	323
11.4.2 内部结构	323
11.4.3 群体控制	324
11.4.4 n^2 复杂度管理	324

11.4.5 外观效果	325
11.5 本章小结	325
参考文献	325
第 12 章 特殊动画模型	329
12.1 隐式表面	329
12.1.1 基本的隐式表面方程	329
12.1.2 基于隐式定义对象的动画效果	331
12.1.3 碰撞检测	332
12.1.4 基于碰撞的隐式表面变形	332
12.1.5 Level Set 法	334
12.1.6 综述	335
12.2 植物	335
12.2.1 植物学简介	336
12.2.2 L 系统	337
12.2.3 综述	343
12.3 表面细分	344
12.4 本章小结	345
参考文献	345
附录 A 渲染技术	349
A.1 双缓冲区机制	349
A.2 合成机制	350
A.2.1 忽略像素深度信息的合成技术	351
A.2.2 基于像素深度信息的合成技术	355
A.3 显示运动对象: 运动模糊	357
A.4 投影式阴影	359
A.5 广告牌和替身图技术	363
A.6 小结	364
参考文献	364
附录 B 背景知识和技术	367
B.1 向量和矩阵	367
B.1.1 逆矩阵和线性方程求解	368
B.1.2 奇值分解法	374
B.2 几何计算	374
B.2.1 向量分量	375
B.2.2 向量长度	375

B.2.3	两向量的点和计算	375
B.2.4	两向量的叉积计算	376
B.2.5	向量和矩阵计算法则	377
B.2.6	三维空间内两直线间的最近点	380
B.2.7	面积计算	381
B.2.8	余弦定理	382
B.2.9	质心坐标	383
B.2.10	计算包围边界形状	383
B.3	变换操作	396
B.3.1	基于向量-矩阵乘法的顶点变换	396
B.3.2	基于向量-矩阵乘法的向量变换	397
B.3.3	轴-角旋转	398
B.3.4	四元数	398
B.4	基于链接附肢的 Denavit-Hartenberg 表现形式	400
B.4.1	Denavit-Hartenberg 表示法	400
B.4.2	简单示例	403
B.4.3	添加球状关节	403
B.4.4	构建坐标系	405
B.5	插值计算和近似曲线	405
B.5.1	方程：基本术语	405
B.5.2	简单的线性插值计算：几何体和代数形式	407
B.5.3	基于弧长的参数化操作	408
B.5.4	导数计算	408
B.5.5	Hermite 插值计算	408
B.5.6	Catmull-Rom 样条	409
B.5.7	4 顶点形式	412
B.5.8	混合抛物线	412
B.5.9	Bezier 插值/逼近方案	413
B.5.10	基于 De Casteljau 构造方案的 Bezier 曲线	414
B.5.11	张力、连续性以及偏移控制	414
B.5.12	B 样条	417
B.5.13	曲线与顶点集合之间的匹配	417
B.6	随机性	418
B.6.1	噪声	419
B.6.2	扰动效果	421
B.6.3	随机数生成器	422

B.7 物理初探	423
B.7.1 位置、速度和加速度	423
B.7.2 圆周运动	424
B.7.3 牛顿运动定律	425
B.7.4 惯性和惯性参考坐标系	425
B.7.5 质心	426
B.7.6 转矩	426
B.7.7 平衡状态：平衡作用力	426
B.7.8 重力	427
B.7.9 向心力	427
B.7.10 接触力	427
B.7.11 离心力	429
B.7.12 功和势能	429
B.7.13 动能	429
B.7.14 能量守恒	430
B.7.15 动量守恒	430
B.7.16 振荡运动	430
B.7.17 阻尼机制	431
B.7.18 角动量	431
B.7.19 惯性张量	431
B.8 数值积分	432
B.8.1 基于弧长的函数积分计算	433
B.8.2 更新函数值	434
B.8.3 更新位置数据	437
B.9 优化技术	438
B.9.1 解析法	439
B.9.2 数值法	439
B.10 电影技术标准	441
B.10.1 模拟技术	441
B.10.2 数字世界	445
B.11 相机校正	448
参考文献	451