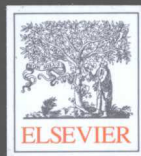




计算机动画算法与技术 (第2版)

Rick Parent 著
刘 祎 译

Computer Animation
Algorithms and Techniques, Second Edition



清华大学出版社

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, 2e

Rick Parent

ISBN: 9780125320009

Copyright © 2008 by Elsevier. All rights reserved.

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

Copyright © 2012 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。

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=Computer Animation, Algorithms and Techniques: 英文/(美) 帕伦特 (Parent, R.) 著; 刘祎译. —2 版. —北京: 清华大学出版社, 2012.10

ISBN 978-7-302-29516-7

I. ①计… II. ①帕… ②刘… III. ①计算机动画-英文 IV. ①TP391.41

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 170506 号

责任编辑: 赵洛育

封面设计: 刘超

版式设计: 文森时代

责任校对: 张彩凤

责任印制: 王静怡

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: 清华大学印刷厂

经 销: 全国新华书店

开 本: 185mm×260mm 印 张: 29 彩 插: 4 字 数: 685 千字

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

印 数: 1~4000

定 价: 89.00 元

产品编号: 042025-01

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斷追求，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、电影之后的人类历史上的第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，除刘祎外，翁桂荣、康熙丽、孙颖、万立梅、陈丽丽、龙清伟、邵利萍、高影、安娇娇、李霞、刘笑彤、周宏丽、魏晶、李芳芳、张凤欣、高阳、胡艳娇、商婵婵、武变琴、顾庆娟、蒋丽丽、张超、赵雅利、吕莹莹、贾亚飞、古庆梅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）。据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 部上榜电影中就有 1 部为计算机动画电影。从 2001 年至 2006 年，数字图像技术领域出现了 27 位“科技成就奖”和“科学和工程奖”获得者。每年，计算机动画还为游戏产业创造不低于 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可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，通过复制、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 章则讨论与运动捕捉（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 章则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。

最后，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 则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 即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。同时, 要感谢 Scott King (面部动画)、David Ebert (云彩)、Doug Roble (运动捕捉)、Matt Lewis (虚拟人物) 以及 Meg Geroch (抵达行为)。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. E. Catmull, "The Problems of Computer-Assisted Animation," *Computer Graphics* (Proceedings of SIGGRAPH 78), 12 (3), pp. 348–353 (August 1978, Atlanta, Ga.).
2. M. Levoy, "A Color Animation System Based on the Multiplane Technique," *Computer Graphics* (Proceedings of SIGGRAPH 77), 11 (2), pp. 65–71 (July 1977, San Jose, Calif.). Edited by James George.
3. N. Magnenat-Thalmann and D. Thalmann, *Computer Animation: Theory and Practice*, Springer-Verlag, New York, 1985.

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 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 迪斯尼.....	7
1.2.4 其他技术.....	8
1.2.5 其他动画媒介.....	8
1.2.6 动画原理.....	9
1.2.7 电影制作原理.....	10
1.3 动画制作.....	12
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.....	18
1.4.3 数字视频.....	20
1.4.4 数字音频.....	21
1.5 计算机动画简史.....	22
1.5.1 早期行为（1980 年之前）.....	22
1.5.2 中期行为（20 世纪 80 年代）.....	24
1.5.3 新纪元（20 世纪 80 年代以后）.....	26
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.....	38
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	50
2.2.1	定角表达	51
2.2.2	欧拉角表达	52
2.2.3	轴角表达	53
2.2.4	四元数表达	54
2.2.5	指数映射表达	55
2.3	本章小结	56
	参考文献	56
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	84
3.4	与路径协同工作	88
3.4.1	路径移动	88
3.4.2	基于路径的方向	88
3.4.3	基于路径平滑操作	92
3.4.4	沿表面确定路径	97
3.4.5	路径计算	98
3.4.6	综述	99
3.5	本章小结	99
	参考文献	99
第4章	插值动画技术	100
4.1	关键帧系统	100
4.2	动画语言	103
4.2.1	面向设计人员的动画语言	104
4.2.2	基于动画设计的全功能程序语言	105
4.2.3	关联变量	105

4.2.4	图形语言	105
4.2.5	基于角色的动画语言	106
4.3	对象的变形操作	107
4.3.1	拾取和拖曳	107
4.3.2	嵌入空间的变形	108
4.4	三维形状插值方案	119
4.4.1	匹配拓扑结构	120
4.4.2	星形多面体	120
4.4.3	轴向切面	121
4.4.4	球体映射	123
4.4.5	递归细分	127
4.4.6	综述	129
4.5	变形效果（二维）	129
4.5.1	坐标网格方案	129
4.5.2	特征变形	134
4.6	本章小结	139
	参考文献	139
第 5 章	运动链接	142
5.1	层次结构建模	143
5.1.1	基于层次建模的数据结构	144
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	156
5.3.4	综述	162
5.4	本章小结	163
	参考文献	163
第 6 章	运动捕捉	164
6.1	运动捕捉技术	164
6.2	图像处理	165
6.3	相机校正	167
6.4	三维位置重构	168
6.4.1	多标记	169
6.4.2	多相机	170

6.5	骨骼匹配.....	170
6.6	从运动捕捉系统中输出内容.....	171
6.7	操控运动捕捉数据.....	172
6.7.1	信号处理.....	173
6.7.2	运动重定位.....	173
6.7.3	运动组合.....	174
6.8	本章小结.....	174
	参考文献.....	174
第7章	物理动画	176
7.1	基本物理学知识.....	176
7.2	弹性网格.....	178
7.2.1	弹性对象.....	178
7.2.2	虚拟弹簧.....	181
7.3	粒子系统.....	181
7.3.1	生成粒子.....	182
7.3.2	粒子属性.....	183
7.3.3	粒子消亡.....	183
7.3.4	粒子动画.....	183
7.3.5	粒子渲染.....	183
7.3.6	粒子系统表达.....	184
7.3.7	粒子受力状态.....	184
7.3.8	粒子生命周期.....	185
7.4	刚体模拟.....	185
7.4.1	自由落体.....	186
7.4.2	碰撞体.....	194
7.4.3	基于链接层次结构的动力学.....	205
7.4.4	综述.....	208
7.5	软约束条件和硬约束条件.....	208
7.5.1	能量最小化.....	208
7.5.2	空间-时间约束条件.....	211
7.6	本章小结.....	212
	参考文献.....	213
第8章	流体:液体和气体	216
8.1	特定流体模型.....	216
8.1.1	水流模型.....	216
8.1.2	云彩模型.....	226

8.1.3 火焰建模.....	234
8.1.4 综述.....	236
8.2 计算流体动力学.....	236
8.2.1 流体建模的通用解决方案.....	237
8.2.2 CFD 方程.....	238
8.3 本章小结.....	242
参考文献.....	243
第 9 章 人物角色的建模和动画.....	246
9.1 虚拟人物表现方式.....	246
9.1.1 躯体几何体的表达方式.....	247
9.1.2 几何体数据采集.....	248
9.1.3 几何体变形.....	249
9.1.4 表面细节.....	249
9.1.5 人物角色建模过程中的层次方案.....	250
9.2 搜索和抓取行为.....	253
9.2.1 手臂建模.....	254
9.2.2 肩部关节.....	256
9.2.3 手部.....	256
9.2.4 协调的运动行为.....	258
9.2.5 回避障碍物.....	258
9.2.6 受力状态.....	259
9.3 行走效果.....	260
9.3.1 运动机制.....	261
9.3.2 行进过程中的动力学.....	264
9.3.3 基于动力学的真实运动行为.....	267
9.3.4 前向动力学控制.....	268
9.3.5 综述.....	268
9.4 人物的服饰.....	269
9.4.1 布料和服装.....	269
9.4.2 简单的悬垂方案.....	269
9.4.3 布料内部结构.....	272
9.4.4 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.....	298
10.3.5	综述.....	298
10.4	口型动画.....	299
10.4.1	语音发声.....	299
10.4.2	音素.....	300
10.4.3	协同发音.....	301
10.4.4	韵律学.....	301
10.5	本章小结.....	301
	参考文献.....	302
第 11 章	建模行为.....	305
11.1	环境认知.....	305
11.1.1	视觉.....	306
11.1.2	记忆.....	307
11.2	累计行为.....	307
11.3	原始行为.....	308
11.3.1	群集行为.....	308
11.3.2	捕食行为.....	317
11.4	智能行为建模.....	317
11.4.1	自主行为.....	318
11.4.2	表达方式和姿态.....	320
11.4.3	个性化建模：个性和情感状态.....	321
11.5	群体管理.....	322
11.5.1	突发行为.....	322
11.5.2	基于统计学的建模行为.....	322
11.5.3	内部结构.....	323
11.6	本章小结.....	323
	参考文献.....	323

第 12 章 特殊动画模型	327
12.1 隐式表面	327
12.1.1 基本的隐式表面方程	327
12.1.2 基于隐式定义对象的动画效果	329
12.1.3 碰撞检测	330
12.1.4 基于碰撞的隐式表面变形	330
12.1.5 Level Set 法	332
12.1.6 综述	333
12.2 植物	333
12.2.1 植物学简介	334
12.2.2 L 系统	335
12.3 表面细分	342
12.4 本章小结	343
参考文献	343
附录 A 渲染技术	346
附录 B 背景知识和技术	364

第 1 章 概 述

对于大多数人而言，计算机动画往往等同于“大型”屏幕事件，如电影《星球大战》、《玩具总动员》以及《泰坦尼克号》。然而，计算机动画在好莱坞所饰演的角色远非如此。当然，若通过计算机技术将 20 世纪 70 年代的动画片 *Saturday Morning Cartoons* 重新搬上屏幕，多少会令人难以理解。计算机游戏则利用先进的计算机图形技术成为计算机动画中主要的研发驱动力。另外，SIGGRAPH^①以及品牌节目《芝麻街》中均出现了实时计算机动画的身影。目前，桌面级计算机动画以其相对合理的成本已成流行之势；同时，网络计算机动画业已屡见不鲜；基于飞行训练、反恐执法训练以及核武器反应堆的数字模拟也广泛应用于相关行业中。当然，各类应用环境之间的差异主要体现在价格、期望的图像质量以及交互量和交互类型上。本书并不会强调某一特定的应用环境，而是试图向读者展现各类计算机动画中广泛使用的算法与技术。

这里，计算机动画是指基于计算机的动画显示技术，并用于生成具有运动感的图像。本书重点在于处理三维图形数据的相关算法与技术。总体而言，任何可变值均可实现动画效果。例如，物体的位置和方向可视为实现动画效果的较好的候选对象，此外，物体的形状、着色参数、纹理坐标、光源参数以及相机参数等也可实现相应的动画效果。

本书按如下方式加以组织编排：第 2 章讨论与计算机动画相关的计算机图形学背景知识，为后续学习打下坚实的理论基础，相关内容包括基础几何变换以及对应的图形数据表现方式。如果读者具有较好的计算机图形学知识，则可直接跳过本章的阅读。第 3~11 章介绍各种计算机动画算法和技术。第 12 章阐述计算机动画中普遍使用的某些建模技术。

在计算机动画技术中，存在 3 种基于运动控制的通用解决方案。首先是艺术动画，其中，动画绘制人员主要负责创建角色的运动效果。此处，插值方案构成了艺术动画的基础内容，基于插值方案各类动画技术将在第 3~5 章中加以探讨。其次是数据驱动动画，运动对象经数字化后直接映射至图形对象上。运动捕捉可视为数据驱动动画所采用的主要技术，具体内容将在第 6 章加以讲解。最后是程序动画，其中，计算模型用于控制运动效果。通常情况下，针对某一物理或行为模拟，该过程依据某种方式设置初始条件。程序动画将在第 7~11 章进行专门讲解。

要了解计算机动画，需要着重理解其层次结构、历史和一些相关概念。本章后续内容将讨论运动感知、动画技术进化史、动画产品以及计算机动画中的杰出代表作，从而为进一步学习计算机动画奠定基础。

^① SIGGRAPH, 美国计算机协会 (ACM) 的计算机图形图像特别兴趣小组。

1.1 感 知

人类视觉系统可视为一部复杂的信息处理器，因而图像可快速传送大量的数据信息，随后，处于移动状态的图像还可在短时间内表现更为丰富的信息。实际上，在千变万化的世界中，人类的视觉系统不断演化以适应复杂的生存环境，并可对运动现象做出有效的观察和解释。当一系列图像以快速序列方式显示时，对于观察者而言，诸多图像将呈现为单一的运动图像，这一点已被人们广泛接受。考虑到眼睛和大脑的复杂结构，以及一定的观察条件和某一固定的回放率，根据静态图像序列创建连续的运动图像是可行的。较为常见的观察方式源于视觉的持久性，其中，当显示对象消失后，人眼将对该图像持有短暂映像。有人认为，这一类被称为独立静态正后像的短暂映像，可填充图像之间的空隙，从而使得处于连续变化中的图像生成某种运动感。Peter Roget 于 1824 年即指出“视网膜上的光线映像”这一概念（参见本章参考文献 35）。然而，视觉感知状态与运动感之间并不完全相同。例如，快速旋转某一白色光源将生成静态的白色光环，虽然该效果源于视觉持久性，但其结果则呈现为静止状态。一组连续的光源照明，例如影院屏幕的投射光线，将会令观众产生某种错觉，即被照亮对象将围绕相关标识进行旋转。此时，观众可感知当前运动状态，但由于不存在个体图像，因而不存在视觉持久性问题。最近，视觉感知机制的（生理学）因果关系已受到某种质疑，且运动感多归结于某种生理机制，称之为 ϕ 现象，而视运动则称作 β 运动（参见本章参考文献 1、2、13）。

无论底层机制以何种方式实现，其结果均表现为连续的图像以某种速率加以显示，进而骗过观众的眼睛并令其认为当前画面呈现为连续的映像，这一点在电影以及其他视频内容中表现得尤为明显。当无法生成连续的视觉画面感时，显示结果将呈现为闪烁状态。此时，对于眼睛和大脑而言，动画表现为快速的静态图像序列。根据环境条件，例如室内光照和观察距离，可适当调整个体图像的回放频率，以维护映像画面的连续感。该回放频率也称作临界闪烁频率（参见本章参考文献 8）。

对于构建连续的画面效果，运动感包含相应的下限条件；相应地，对于眼睛的感知内容，运动感亦存在对应的上限条件。眼睛中的神经末梢可持续对环境光进行采样。另外，运动感所包含的制约条件部分取决于此类感知器官的反应时间以及其他相关机制，例如眨眼时间以及目标跟踪状态。如果某一对象相对于观察者移动过快，则眼睛中的神经末梢无法及时地将当前内容反馈至大脑，进而无法准确地分辨某些细节内容，这将产生运动模糊效果（参见本章参考文献 11）。在静态图像序列中，运动模糊源于对象的速度以及场景采样的时间间隔。在静态相机中，如果快门相对于对象的速度具有较好的反应速度，则快速移动的对象通常不会呈现为模糊状态。在计算机图形学中，如果在时间上对场景实现精准采样，运动模糊状态就可得到有效的抑制。当然，若对场景实施运动模糊计算，则需要根据相应的时间间隔进行采样或加以控制，以使最终的画面结果呈现为较为自然的状态（参见本章参考文献 21、32；也可参考附录 A.3 以获取更多与运动模糊计算相关的内容）。如

果未采用运动模糊计算，则快速移动对象的图像多呈现为不连续的运动状态，其结果类似于采用闪光灯后的实景拍摄，这一类效果常称作频闪。在手绘动画中，快速移动的对象通常在移动方向上进行绘制，以使邻接帧之间的图像彼此叠加（参见本章参考文献 48），进而减少频闪效果。

综上所述，下面将讨论两种频率。首先是回放率或刷新率，即可视化处理过程中每秒显示的图像数量；其次是采样率或更新率，即每秒所产生的不同图像的数量。其中，回放率与闪烁现象相关。采样率则定义了运动本身所呈现的稳定状态。例如，遵循美国国家电视标准委员会（NTSC）格式的电视信号将以每秒约 30 帧的频率显示图像画面^①，当采用隔行扫描时^②，则扫描场将以每秒 60 帧的频率加以显示，从而可有效地防止正常视见条件下的闪烁现象（参见本章参考文献 34）。在某些电视节目（如 *Saturday Morning Cartoons*）中，每秒可能仅包含 6 幅不同的图像，且每幅图像重复显示 5 次。通常，考虑到单帧绘制略显仓促（即单帧动画），因而口型同步动画多采用双帧绘制（即每隔一帧）。电影的回放率通常为 24 帧/秒（fps）（美国标准），但为了减少闪烁现象，每帧可显示两次（即双快门），进而可获得较为高效的 48fps 的刷新率。另外，考虑到 NTSC 电视信号采用隔行扫描技术，则通过每隔 1/60s 对当前场景进行采样，即可获得更为平滑的运动效果，即使全部帧仅以 30fps 的速率进行回放（参见本章参考文献 8）。计算机设备多采用逐行扫描技术（而非隔行扫描），其刷新率通常不低于 70fps（参见本章参考文献 34）。另外，关于各种电影和視頻格式，读者还可参考附录 B.9 以获取更多详细内容。

1.2 动画发展简史

通常意义上讲，动画^③意味着具有某种生命信息，并包含某些实景木偶（例如《芝麻街》中的角色）。除此之外，某些还会采用机电装置移动木偶，即实景机械效果。人类发展历史充满了各种尝试并伴随着新事物的诞生，这部历史结合了神话、魔幻、娱乐、科技以及医学。动画多以故事的方式加以展现，并将某种生命力赋予人类的化身，例如皮格马利翁、普罗米修斯、歌德作品《浮士德》中瓦格纳所创造的“人造人”以及雪莱作品中的“科学怪人”。另外，人们还曾发明机械装置用以模拟人类的行为，例如，18 世纪 30 年代，Jacque Vaucanson 曾用机械装置模拟长笛演奏者、鼓手以及消化鸭（即机械鸭子，用以模拟消化系统）；1769 年，Wolfgang von Kempelen 发明了会下棋的机械装置；1774 年，Pierre Jaquet-Droz 制造了一台能够书写的自动操作装置；当前则有较为流行的、具有一定人类特征的机器人。在 17 和 18 世纪，人们曾对人体的机械特征展开了激烈的辩论，早期的机械装置正是在这

^① 更严格地讲，由美国国家电视标准委员会（NTSC）创建的广播电视系统格式将帧速率定义为 29.97 帧/秒（fps，参见本章参考文献 29）。

^② 隔行扫描显示技术将一帧划分为两个场，且每一个场都由奇、偶扫描线构成。同时，奇、偶场通过显示设备交替扫描的方式加以显示（参见本章参考文献 8）。

^③ 动画更为严格的定义通常会使用到静态图像序列，进而生成某种视觉运动感。严格的定义并未将相关技术（例如机电装置动画）以及皮影视为此列。

种氛围下应运而生。例如，Julien Offray de La Mettrie 于 1747 年撰写的 *L'Homme Machine* 一书便颇受争议（该书的英文版译作 *Man a Machine*）。在模拟人体机械装置的行为中，魔术师、钟表匠、哲学家、科学家、艺术家、解剖学家、手套制造者以及外科医生等功不可没，这可参考 Gaby Wood 所撰写的关于机械寿命的一项娱乐调查一书（参见本章参考文献 49）。本书中，与机械装置相关的内容主要集中于如何利用多幅独立的静态图像创建某一运动图像，这一类装置与手绘动画紧密相关。

1.2.1 早期设备

视觉持久性以及将一系列静止图像解释为运动图像在 19 世纪已得到了广泛地研究（参见本章参考文献 5），这远远早于电影摄像机的发明时间。随着对事物认知能力的不断提高以及研究过程的不断深入，各种演示装置亦层出不穷（参见本章参考文献 23、28）。在早期的动画装置中，留影盘或许可视为一类最简单的设备，两面均绘制有图像的圆盘在两边由绳子加以连接（见图 1.1），通过转动绳子，圆盘可在前后方向上实现快速翻转。当旋转速度足够快时，将形成两幅图像彼此叠加在一起的视觉映像。例如，可将圆盘一面绘制一只鸟，另一面绘制一个鸟笼，当圆盘旋转时，视觉映像则是小鸟位于鸟笼中。与此类似的简单技术则是手翻书，书中每页纸上均绘有单一图像，当纸张被快速翻阅时，观察者会感受到某种运动感。

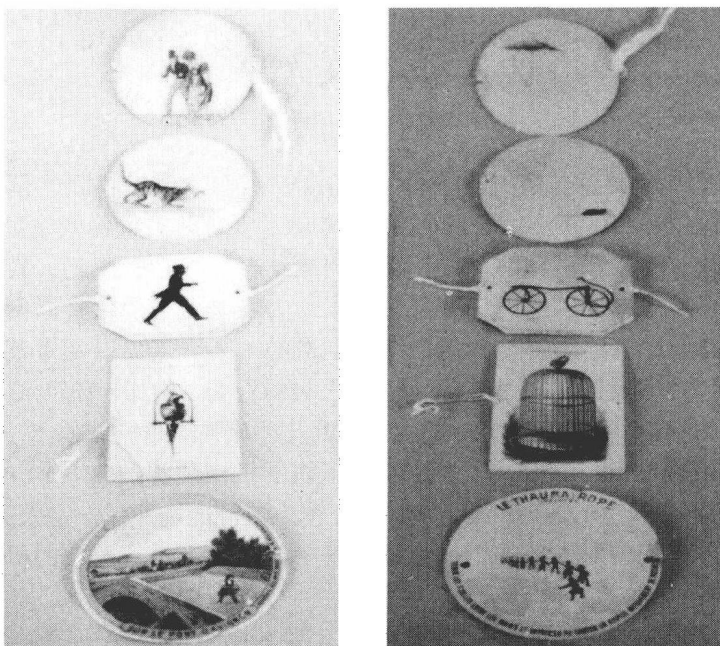


图 1.1 留影盘

早期较为著名的动画装置之一是西洋镜，或称作回转盘，其形状多为矮小且口径较大的圆柱体，圆柱体可围绕自身的对称轴旋转，其内壁绘有一系列的图案，彼此邻接的图案