

智能科学技术著作丛书

# 人 工 鱼

班晓娟 艾冬梅 著  
陈泓娟 宁淑荣

国家自然科学基金项目资助

科 学 出 版 社

北 京

## 内 容 简 介

本书详细介绍了“人工鱼”研究的背景,目前的研究成果,以“晓媛的鱼”为基础的人工鱼总体设计方案、关键技术、算法及动画效果,人工鱼的自繁衍理论和方法,人工鱼的竞争机制和定向演化,人工鱼的自规划、自学习模型和方法,人工鱼群的研究情况,人工情感在人工鱼中的应用等。

本书可作为计算机图形学、计算机动画、虚拟现实、人工智能等领域从事教学、科研与开发的教师、研究人员的参考书,也可作为相关专业研究生和高年级本科生教材。

### 图书在版编目(CIP)数据

---

人工鱼/班晓娟等著. —北京:科学出版社, 2007

ISBN 978-7-03-020002-1

I. 人… II. 班… III. 三维—动画—计算机图形学 IV. TP391.41

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 144618 号

---

责任编辑:童安齐 庞海龙 / 责任校对:耿耘

责任印制:吕春珉 / 封面设计:耕者设计工作室

**科学出版社** 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

http://www.sciencep.com

印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2007 年 10 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2007 年 10 月第一次印刷 印张: 15 3/4

印数: 1—2 500 字数: 320 000

**定价: 36.00 元**

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

销售部电话 010-62136131 编辑部电话 010-62137026 (B108)

## 《智能科学技术著作丛书》编委会

名誉主编：吴文俊

主 编：涂序彦

副 主 编：钟义信 史忠植 何华灿 蔡自兴 孙增圻 童安齐 谭 民

秘 书 长：韩力群

副秘书长：田士勇

编 委：(按姓氏汉语拼音排序)

蔡庆生(中国科技大学)

蔡自兴(中南大学)

杜军平(北京工商大学)

韩力群(北京工商大学)

何华灿(西北工业大学)

何 清(中国科学院计算技术研究所)

黄河燕(中国科学院计算语言研究所)

黄心汉(华中科技大学)

焦李成(西安电子科技大学)

李祖枢(重庆大学)

刘 宏(北京大学)

刘 清(南昌大学)

秦世引(北京航空航天大学)

邱玉辉(西南师范大学)

阮秋琦(北京交通大学)

史忠植(中国科学院计算技术研究所)

孙增圻(清华大学)

谭 民(中国科学院自动化研究所)

田士勇(科学出版社)

童安齐(科学出版社)

涂序彦(北京科技大学)

王国胤(重庆邮电学院)

王家钦(清华大学)

王万森(首都师范大学)

吴文俊(中国科学院系统科学研究所)

杨义先(北京邮电大学)

尹怡欣(北京科技大学)

于洪珍(中国矿业大学)

张琴珠(华东师范大学)

钟义信(北京邮电大学)

庄越挺(浙江大学)

## 《智能科学技术著作丛书》序

“智能”是“信息”的精彩结晶，“智能科学技术”是“信息科学技术”的辉煌篇章，“智能化”是“信息化”发展的新动向、新阶段。

“智能科学技术”（intelligence science & technology，简称 IST）是关于“广义智能”的理论方法和应用技术的综合性科学技术领域，其研究对象包括：

- “自然智能”（natural intelligence，简称 NI），包括：“人的智能”（human intelligence，简称 HI）及其他“生物智能”（biological intelligence，简称 BI）。
- “人工智能”（artificial intelligence，简称 AI），包括：“机器智能”（machine intelligence，简称 MI）与“智能机器”（intelligent machine，简称 IM）。
- “集成智能”（integrated intelligence，简称 II），即：“人的智能”与“机器智能”人机互补的集成智能。
- “协同智能”（cooperative intelligence，简称 CI），指：“个体智能”相互协调共生的群体协同智能。
- “分布智能”（distributed intelligence，简称 DI），如：广域信息网，分散大系统的分布式智能。

1956年，“人工智能”学科诞生，50年来，在起伏、曲折的科学征途上不断前进、发展，从狭义人工智能走向广义人工智能，从个体人工智能到群体人工智能，从集中式人工智能到分布式人工智能，在理论方法研究和应用技术开发方面都取得了重大进展。如果说，当年“人工智能”学科的诞生是生物科学技术与信息科学技术、系统科学技术的一次成功的结合，那么，可以认为，现在“智能科学技术”领域的兴起是在信息化、网络化时代又一次新的多学科交融。

1981年，“中国人工智能学会”（Chinese Association for Artificial Intelligence，简称 CAAI）正式成立，25年来，从艰苦创业到成长壮大，从学习跟踪到自主研发，团结我国广大学者，在“人工智能”的研究开发及应用方面取得了显著的进展，促进了“智能科学技术”的发展。在华夏文化与东方哲学影响下，我国智能科学技术的研究、开发及应用，在学术思想与科学方法上，具有综合性、整体性、协调性的特色；在理论方法研究与应用技术开发方面，取得了具有创新性、开拓性的成果。“智能化”已成为当前新技术、新产品的发展方向 and 显著标志。

为了适时总结、交流、宣传我国学者在“智能科学技术”领域的研究开发及应用成果，中国人工智能学会与科学出版社合作编辑出版《智能科学技术著作丛书》。需要强调的是，这套丛书将优先出版那些有助于将科学技术转化为生产力

以及对社会和国民经济建设有重大作用和应用前景的著作。

我们相信，有广大智能科学技术工作者的积极参与和大力支持，以及编委们的共同努力，《智能科学技术著作丛书》将为繁荣我国智能科学技术事业、增强自主创新能力、建设创新型国家做出应有的贡献。

祝《智能科学技术著作丛书》出版，特赋贺诗一首：

**智能科技领域广  
人机集成智能强  
群体智能协同好  
智能创新更辉煌**

涂序彦

中国人工智能学会荣誉理事长

2005年12月18日

## 序

鱼儿虽小，却是活性四溢：游弋，栖息，嬉戏，觅食，避敌，求偶，竞争以及自适应，自学习，自规划，自组织，自繁衍，……无一不显现出生命体所独有的聪颖习性和活力特征。

在整个生命世界的广阔谱系中，人类是万物之灵，但却过于复杂；蛋白质是生命之元，或许过于单纯。涂晓媛、班晓娟、陈泓娟等一批青年才俊选择“鱼”作为人工生命研究的切入点，可以说是独具慧眼，独具匠心，而且做得很出色。所以，当她（他）们完成了《人工鱼》的著作要我来写序的时候，我确实觉得无由推却，于是欣然命笔，写下了以下的感想。

人工生命是 20 世纪 80 年代出现的研究新领域，它的基本宗旨是要利用生命科学、信息科学、系统科学和工程技术的理论和方法研究“具有某种或某些自然生命特征”的人造系统。通过这种研究，一方面可以模拟生命体的某些功能以制造人工系统来补足生命体相应功能的缺陷，也可以把生命体固有的许多“高超本领”移植到人造机器系统之中，使后者具有某种或某些生命体的能力，可以有效地帮助人类执行某种或某些复杂的任务；另一方面，通过这种研究也可以反过来加深人们对于某些生命规律的认识，改善生命体本身的性能。因此，人工生命的研究具有十分重要的意义。

正是在这个意义上可以认为，人工生命与人工智能的研究具有异曲同工的关系。因为从本质上说，任何生命体都具有某种程度的智能（从非常简单的智能到非常复杂的智能），因此模拟生命就不可避免地要模拟生命体的智能。但是，人工生命的研究范畴可以比人工智能更加广阔，因为人工生命的研究除了可以模拟生命体的智能特征以外，还可以模拟生命体的非智能特征，而人工智能原则上却不关心那些非

智能的特征。

当然，人工生命的研究不仅与人工智能的研究有关。实际上，为了研究人工生命，人们不仅必须深入研究关于生命体本身的生命科学和心理科学，还必须研究用以模拟生命现象的各种理论、方法和工程技术手段，包括数学、物理学、信息科学、系统科学、控制科学、计算机图形学、动画学、材料科学以至虚拟现实等技术。因此，人工生命是一个典型的交叉科学。

世间的实际事物（特别是作为科学研究对象的事物）是复杂的。为了认识这些复杂的事物，近代人们发明了“分而治之”的方法论，即把复杂的事物分解成为许多复杂度相对较低的部分，然后对这些部分进行分析研究，这样便形成了许许多多（而且越来越多）的分支学科，促进了近代科学的繁荣。然而，随着科学研究的进一步深入，人们逐渐发现，面对实际的复杂问题，即使相关的分支学科都研究清楚了，却不一定能够解决原来的实际问题。这就是著名的“整体大于部分和”的系统学原理：要想从各个部分恢复出整体，不是简单地把各个部分相加起来就能成功；而是还必须把原来分解过程中丢失的“部分之间的复杂联系及其相互作用（交叉）”找回来。这就是为什么当今世界科学研究要进入交叉科学时代的重要原因。因此，我们不仅需要懂得如何“分而治之”，还要懂得如何“治而合之”。这是现代科学方法论的要点之一。

本书是在国家自然科学基金资助及在涂序彦教授指导下，由北京科技大学人工鱼与智能软件研究室一批青年研究人员的研究成果提炼而成。本书的写作基本体现了上述交叉科学的精神。当然，书中也有一部分内容是发展中的新课题，还需要做进一步的探索。例如，也许有人会问：鱼有感情吗？这是一个非常有趣的问题，我们可以用一个古老的典故来回答：您不是鱼，您怎么知道鱼儿没有感情呢？科学研究可以提出假设，能够得到科学证实的假设便成为科学结论。

我国提出了要在2020年建设成为“创新型国家”的目标，这是一项意义深远的伟大事业。毫无疑问，这项伟大的事业主要依靠像本书

作者这样的几代青年人来承担。在此，我衷心感谢青年科技工作者与教育工作者们在建设创新型国家的伟大事业中所做出无愧时代要求的积极贡献，并祝愿他们在未来的研究探索中不断获得新的进展和新的应用。

中国人工智能学会理事长

北京邮电大学教授

钟义信 谨志

2007年教师节

## 前 言

20世纪80年代后期诞生的人工生命是当前生命科学、信息科学、系统科学及工程技术科学等学科交叉研究的热点，也是人工智能、计算机、自动化科学技术的发展动向之一。人工生命研究具有“自然生命”特征和功能的人造系统，它的研究有三种途径：生物科学途径，如克隆羊；工程技术途径，如人工鱼；生物科学加工程技术途径。基于计算机科学技术的人工生命方法是通过合成的、计算的方法去理解自然生命，弥补了传统的生物分析方法的不足，也就是说，人工生命方法不是通过分析解剖活的生物去研究生物系统，而是尝试着去合成行为表现像活的生物体的人工系统，其中一个重要方面是“人工动物”的合成。

人工智能诞生，形成了计算机科学的新领域，开拓了计算机研究与发展的一些新思维、新方法。人工智能的研究目标之一就是模拟复杂的生物过程，如学习和记忆等。这些自然功能是数百万年来生物进化的结果。现在，人们开始利用这一机理来研究人工生命。人工生命方法是用计算机或其他人工手段模拟自然生命，它结合了生物科学等领域的一些新技术、新观点，将人工智能的研究带入了一个崭新的阶段。人工智能领域涉及许多复杂的专业和领域，单一强调某方面都不可能达到预期目的。由于人工智能本身的特殊性，仅仅依靠传统的计算机模式无法满足我们的需要，所以它必须与多种学科结合，尤其是与生命科学结合，才能有所突破，解决问题。

随着计算机图形学和硬件技术的高速发展，计算机动画近十几年也取得了很大的发展，正逐渐渗透到我们生活的各个方面。如何在动画中逼真地展现自然界栖息着的具有复杂运动和行为的自然生态系统的动画，对计算机动画创作者来说，是富有吸引力和挑战性的难题。在一个动画系统中，可能会有大量的动物，每个动物都表现出不同的行为。在理想情况下，动画师希望以最少的劳动获得丰富、复杂的自

然景观，不仅要表现栩栩如生的外观形态，而且要表现每个动物的复杂运动和它们的各种行为，其困难程度可想而知。然而，在目前计算机图形学中，大多数动物的动画是采用传统的、花费大量劳动的关键帧技术制作的。因此，需要研究和开发计算机动画的新方法、新技术。

本书内容在国家自然科学基金项目的支持下，以人工生命、人工智能理论为基础，以人工鱼为具体研究对象，研究计算机动画中人工动物的个体行为与群体行为的模型、人工动物的自繁衍与自进化模型、人工动物的高级行为规划模型及人工动物的情感模型等。

本书共分为十一章，从内容上可划分为六个部分。第一部分包括第一章和第二章，主要介绍人工生命、计算机动画的研究动态及人工鱼目前的研究成果；第二部分包括第三章和第四章，主要介绍以晓媛的鱼为基础的人工鱼的总体设计方案、关键技术及动画效果；第三部分包括第五章和第六章，主要介绍人工鱼的自繁衍理论和方法、人工鱼的竞争机制和定向演化；第四部分包括第七章和第八章，主要介绍人工鱼的自规划、自学习模型和方法；第五部分为第九章，主要介绍人工鱼群的研究情况；第六部分为第十章，主要介绍人工情感在人工鱼中的应用。

本书是北京科技大学人工鱼与智能软件研究室共同研究成果的提炼与总结，在撰写过程中，结合了多年来研究生的实践，参阅了国内外相关文献资料。全书整体结构和主要内容由班晓娟主持完成。本书第一章由班晓娟撰写；第二章由张淑军撰写；第三、四章由江道平和孟宪宇撰写；第五、六章由艾冬梅和陈泓娟共同撰写；第七、八章由班晓娟和孟祥嵩共同撰写；第九章由江道平撰写；第十章由宁淑荣撰写；第十一章由班晓娟撰写。

本书所述成果的研究得到国家自然科学基金项目（No. 60503024）的资助，在此作者表示衷心的感谢！

本书主要内容来源于作者在涂序彦教授指导下所获的研究成果，在此谨向他表示最诚挚的感谢和崇敬之情。书中有些内容已开始应用到实际中，因而比较完善和系统；有些内容还只是局限在理论探索阶段，有待发展和深化。

钟义信教授审阅了全书并为本书作序；研究生李欣、杨云妹、张慧敏、史晶等在绘图、录入等方面也做了大量工作，在此作者一并表

示衷心的感谢。

由于作者学识有限，书中难免存在不妥之处，希望广大读者给予批评指正。

# 目 录

《智能科学技术著作丛书》序

前言

第一章 绪论 .....	1
1.1 引言 .....	1
1.2 计算机动画技术 .....	1
1.2.1 关键帧动画 .....	2
1.2.2 变形物体的动画 .....	3
1.2.3 过程动画 .....	3
1.2.4 关节动画和人体动画 .....	4
1.2.5 基于物理模型的动画 .....	4
1.2.6 智能动画 .....	5
1.3 人工生命与广义人工生命 .....	7
1.3.1 人工生命的概念 .....	8
1.3.2 人工生命的研究内容 .....	9
1.3.3 人工生命的基础理论 .....	11
1.3.4 广义人工生命 .....	13
1.4 计算机动画的人工生命方法 .....	14
1.5 人工智能技术在计算机动画中的应用 .....	15
1.5.1 人工智能 .....	15
1.5.2 人工智能与计算机动画 .....	16
参考文献 .....	16
第二章 人工鱼的研究 .....	21
2.1 引言 .....	21
2.2 基于行为建模的人工鱼——晓媛的鱼 .....	21
2.3 基于认知建模的人工鱼 .....	24
2.4 可交互的人工鱼 .....	25
2.4.1 A-Volve .....	25
2.4.2 人工鱼生态系统 .....	26
2.4.3 虚拟水族馆 .....	27
2.5 作者的工作 .....	28

2.5.1	人工鱼的自繁衍 .....	28
2.5.2	人工鱼的认知和自学习 .....	29
2.5.3	人工鱼多感知系统 .....	32
2.5.4	基于记忆的人工鱼认知模型 .....	33
2.5.5	鱼群行为表现 .....	33
2.5.6	人工鱼交互系统 .....	34
2.5.7	人工鱼的情感研究 .....	35
2.6	人工鱼研究的科学意义 .....	36
	参考文献 .....	37
<b>第三章</b>	<b>人工鱼设计方案 .....</b>	<b>39</b>
3.1	晓媛的鱼的学术意义 .....	39
3.1.1	人工鱼对计算机动画和人工生命的影响 .....	39
3.1.2	人工鱼对计算机视觉和机器人的影响 .....	39
3.1.3	人工鱼在生态学方面潜在的应用 .....	40
3.1.4	其他人工动物 .....	40
3.2	人工鱼的总体方案设计 .....	41
3.2.1	研究目标 .....	41
3.2.2	人工动物 .....	42
3.2.3	人工动物设计目标 .....	42
3.2.4	研究成果 .....	43
3.3	运动系统 .....	44
3.3.1	运动控制器 .....	45
3.3.2	肌肉运动控制器 .....	45
3.3.3	胸鳍运动控制器 .....	46
3.4	人工鱼的感知系统 .....	47
3.4.1	动画的感知建模 .....	48
3.4.2	人工鱼感知系统 .....	48
3.5	行为系统 .....	50
3.5.1	有效行动选择机制 .....	50
3.5.2	行为选择的控制 .....	51
3.5.3	行为的持续性 .....	53
3.5.4	从感知到行为 .....	54
3.5.5	影响行为的内部因素 .....	55
3.5.6	行为程序及基本行为程序举例 .....	57

参考文献 .....	59
<b>第四章 人工鱼的关键技术及动画效果 .....</b>	<b>60</b>
4.1 生物力学模型.....	60
4.1.1 人工鱼身体模型 .....	60
4.1.2 人工鱼的动态模型 .....	60
4.1.3 肌肉与水动力学 .....	62
4.1.4 数字仿真算法 .....	63
4.2 感知聚焦器设计.....	66
4.2.1 动物注意力聚焦 .....	66
4.2.2 聚焦器设计 .....	67
4.2.3 聚焦器控制 .....	69
4.3 可见性计算.....	70
4.3.1 点的可见性 .....	70
4.3.2 其他鱼的可见性 .....	71
4.3.3 圆柱的可见性 .....	71
4.3.4 水草的可见性 .....	71
4.3.5 可视性检测 .....	72
4.4 意图发生器的设计.....	72
4.5 动画效果说明.....	73
4.5.1 捕食者 .....	74
4.5.2 被捕食者.....	74
4.5.3 安居者 .....	77
4.6 基于需求驱动的人工主体的连贯系统模型及算法研究.....	78
4.6.1 系统框架.....	78
4.6.2 内部状态模型 .....	80
4.6.3 需求指导感知 .....	81
4.6.4 基于感知的多目标决策 .....	82
4.6.5 在人工鱼动画系统中的实现 .....	84
参考文献 .....	87
<b>第五章 人工鱼的自繁衍理论和方法 .....</b>	<b>89</b>
5.1 引言.....	89
5.2 人工鱼的基因型与表现型.....	89
5.3 人工鱼的染色体结构模型.....	90
5.4 人工鱼的遗传、杂交和变异.....	92
5.4.1 人工鱼遗传操作设计 .....	93

5.4.2	人工鱼杂交操作设计	96
5.4.3	人工鱼变异操作设计	97
5.5	人工鱼的生命历程模型	99
5.5.1	形态生长模型	99
5.5.2	生理发育模型	102
5.5.3	人工鱼死亡模型	104
	参考文献	104
<b>第六章</b>	<b>人工鱼的进化机制和方法</b>	<b>106</b>
6.1	人工鱼的竞争机制	106
6.1.1	人工鱼的进食竞争	106
6.1.2	人工鱼的交配竞争	106
6.2	人工鱼的进化	107
6.2.1	人工鱼的适应度函数	107
6.2.2	人工鱼的饥饿感函数	111
6.2.3	适应度函数和饥饿感函数的关系	112
6.3	人工鱼群的定向演化	113
6.3.1	人工鱼的择偶	113
6.3.2	分析	116
	参考文献	117
<b>第七章</b>	<b>人工鱼的自规划模型和方法</b>	<b>118</b>
7.1	引言	118
7.2	认知建模方法	119
7.3	高级行为规划器	120
7.4	人工鱼认知模型的特点	122
7.5	预定义行为的认知模型	122
7.5.1	预定义模型的数学表示	122
7.5.2	人工鱼产生交配欲望的认知模型	124
7.5.3	人工鱼产卵的认知模型	128
7.5.4	人工鱼环境选择的认知模型	132
7.6	随意性行为的认知模型	135
7.6.1	人工鱼的感知聚焦器	135
7.6.2	对动画角色的指导	136
7.6.3	面向目标的行为	137
7.6.4	对情景树的子集进行搜索	138
7.7	基于记忆的人工鱼认知模型	143

7.7.1	认知模型的工作过程	144
7.7.2	信息编码	145
7.7.3	聚焦器的设计	146
7.7.4	信息的二次处理和决策器的设计	148
7.7.5	短时记忆与学习	149
7.8	小结	152
	参考文献	152
<b>第八章</b>	<b>人工鱼的自学习方法和技术</b>	<b>154</b>
8.1	引言	154
8.2	人工鱼自学习的特点	154
8.2.1	人工鱼的先天行为	155
8.2.2	人工鱼的后天行为	155
8.3	基于人工神经网络的人工鱼自学习系统	156
8.3.1	强化学习	157
8.3.2	BP网络	157
8.4	基于TD强化学习的BP网络模型	158
8.4.1	TD方法	159
8.4.2	TDBP模型	160
8.5	人工鱼感知系统设计	162
8.5.1	生物学基础——自然鱼的感官	163
8.5.2	人工鱼的感知系统建模	163
8.5.3	人工鱼触觉系统的设计	165
8.5.4	人工鱼嗅觉系统的设计	167
8.5.5	人工鱼味觉系统的设计	167
8.5.6	人工鱼视觉系统的设计	167
8.6	感知动画模拟	174
8.6.1	学习样本与测试样本的获取	174
8.6.2	BP网络训练后的分类结果	174
8.6.3	强化学习的模拟	175
8.7	小结	176
	参考文献	177
<b>第九章</b>	<b>人工鱼群的研究</b>	<b>178</b>
9.1	鱼群形成的生物学原理	178
9.1.1	自然界中的集群现象	178
9.1.2	关于鱼群的生物学研究成果	178

9.1.3	广泛接受的 R-A 模型	179
9.1.4	人工鱼群算法	180
9.2	群体智能	181
9.2.1	群体智能的定义	181
9.2.2	群体智能研究现状	182
9.2.3	群体智能的两种理论模式	182
9.2.4	群体智能的实验平台——Swarm	183
9.2.5	群体机器人	183
9.3	鱼群和多 Agent 系统	184
9.3.1	鱼群的自组织特点	184
9.3.2	鱼群和多 Agent 系统	184
9.3.3	单个 Agent 的能力描述	185
9.3.4	鱼群的协作及多 Agent 系统协作理论	186
9.3.5	鱼群的交互及多系统 Agent 通信机制	189
9.4	群体动画系统	191
9.4.1	群体动画发展现状	191
9.4.2	元胞自动机	191
9.4.3	粒子系统	192
9.4.4	鸟群动画 Boid	193
9.5	人工鱼群的自主动画实现	194
9.5.1	人工鱼认知行为的表现方式——路径	195
9.5.2	系统设计	196
9.5.3	响应环境路径规划——躲避	197
9.5.4	维持鱼群结构路径规划——协作	198
9.5.5	鱼群自组织调度实现	200
9.5.6	展望	205
	参考文献	206
<b>第十章</b>	<b>人工鱼的情感研究</b>	<b>209</b>
10.1	人工情感的定义及研究概况	209
10.1.1	人工情感的定义	209
10.1.2	相关研究现状	210
10.1.3	人工情感的主要研究内容	216
10.2	动物的情感	219
10.3	基于“情+智”的人工鱼研究	219
10.3.1	人工鱼的基本情感	219

---

---

10.3.2	“情+智”协调的意图产生的系统总体框架 .....	220
10.3.3	人工鱼的情感评估 .....	221
10.3.4	意图优先级 .....	223
10.3.5	藏匿处检测 .....	224
10.4	小结 .....	226
	参考文献 .....	226
<b>第十一章</b>	<b>结论和展望</b> .....	<b>228</b>
11.1	总结 .....	228
11.2	展望 .....	230

# 第一章 绪 论

## 1.1 引 言

计算机动画是计算机图形学和动画技术相结合的产物，是伴随着计算机硬件和图形算法发展起来的一门高新技术，其基本含义是通过计算机生成活动的图像。具体来说，计算机动画是指用绘制程序生成一系列的景物画面，其中当前帧画面是对前一帧画面的部分修改。计算机动画涉及物理学、机器人学、生物学、心理学、多媒体技术、虚拟现实等多个学科和领域。

随着计算机图形学和硬件技术的高速发展，计算机动画近十几年取得了很大发展，正逐渐渗透到我们生活的各个方面。在计算机图形学中，大多数计算机动画的创作采用传统的、花费大量劳动的“关键帧”技术，计算机只是用来设计关键帧之间的“中间帧”。用“关键帧”技术创作了不少成功的动画，但也暴露了许多缺点。例如，这需要动画师的大量带动，动画缺乏自主性，繁琐的动作细节规划，自然真实性难以保证等。

如何在动画中逼真地展现自然界栖息着的具有复杂运动和行为的自然生态系统的动画，对计算机动画创作者来说，是富有吸引力和挑战性的难题。在一个动画系统中，可能会有大量的动物，每个动物都表现出不同的行为。在理想情况下，动画师希望以最少的劳动获得丰富、复杂的自然景观。不仅要表现栩栩如生的外观形态，而且要表现每个动物的复杂运动和它们的各种行为，其困难程度可想而知。

当前，人工生命的研究热潮正席卷着美国、欧洲及日本。中国的人工生命研究还处于起步阶段。人工生命研究基本的自然行为，强调生命体在复杂动态的环境中的生存能力。人工智能的研究目标之一就是模拟复杂的生物过程，如学习和记忆等，这些自然功能是数百万年来生物进化的结果。将人工生命与人工智能相结合，研究计算机动画是比较前沿的课题，有很好的理论意义和实用价值。

## 1.2 计算机动画技术

早在 1963~1967 年，美国的 Bell 实验室和一些公司、研究机构、大学就有人着手用计算机制作动画，这些早期的动画系统基本上是二维辅助动画系统，利

用计算机实现中间画面制作和自动上色。从 20 世纪 70 年代开始研制三维辅助动画系统, 采用的运动控制方式, 一般是关键参数插值法和运动学算法。但由于当时硬件和软件水平的限制, 动画制作尚未达到实用阶段。从 20 世纪 80 年代后期起, 计算机硬件取得了惊人的发展, 不论从 CPU 的运行速度还是从存储容量以及各种图形的专用硬件的配备上都发生了巨大的变化; 在软件方面, 许多新算法层出不穷, 从而导致计算机动画技术日趋成熟。目前, 计算机动画已发展成一个多学科和多技术相结合的领域, 它以计算机图形学, 特别是实体造型和真实感显示技术为基础, 涉及图像处理技术、运动控制原理与技术、音频技术、视频技术、机器人学、人工智能等领域。我国对计算机动画技术的应用和研究始于 20 世纪 90 年代初期。

计算机动画的分类方法很多, 从描述的空间上可分为二维动画和三维动画; 从动画的交互程度上可分为非交互动画和交互动画两大类, 而交互动画又可进一步分为非即时计算交互动画和即时计算交互动画; 从实现技术上主要有关键帧动画、变形物体的动画、过程动画、关节动画和人体动画、基于物理的动画、行为动画等。

### 1.2.1 关键帧动画

关键帧技术是计算机动画中最基本并且运用最广泛的方法。关键帧的概念来源于传统的卡通片制作, 熟练的动画师设计卡通片中的关键画面, 然后由普通的动画师设计中间帧。在三维计算机动画中, 中间帧的生成由计算机来完成。另外一种方法是样条驱动动画, 在这种方法中, 用户指定物体运动的轨迹样条, 轨迹样条由用户交互给出。

无论是样条驱动动画还是关键帧插值方法, 都会碰到这个问题: 给定一条物体运动的轨迹, 求物体在某一帧的位置。物体运动的轨迹一般由参数样条来表示。如果直接对参数空间进行等间隔采样, 势必会带来运动的不均匀性, 因而有必要对样条进行弧长参数化。Guenter 等提出了用 Gauss 型数值积分方法计算弧长<sup>[1]</sup>, 用 Newton-Raphson 迭代来确定给定弧长点在曲线上的位置, 并用查找表法记录参数点弧长值的方法来加速计算。在动画设计中, 动画师经常需调整物体运动的轨迹来观察物体运动的效果, 因此交互的速度是一个很重要的因素。Watt 等提出了用向前差分加查找表的方法来提高交互的速度<sup>[2]</sup>。在精度要求不高的情况下, 此方法非常有效。

从原理上讲, 关键帧插值问题可归结为参数插值问题, 传统的插值方法都可应用到关键帧方法中, 但关键帧插值又与纯数学插值不同, 有其特殊性。为了更好地解决插值过程中的时间控制问题, Steketee 等提出了用双插值的方法来控制运动参数<sup>[3]</sup>; Kochanek 等提出了一类适合于 keyframe 系统的三次插值样条<sup>[4]</sup>。

### 1.2.2 变形物体的动画

一般的刚体动画缺乏生气，传统动画的一个特点是赋予每个角色以个性，并以形状变形来渲染效果，虽然传统动画的许多效果用三维动画还很难做到，但计算机动画的研究者们已经在形状变形方面做了很多研究。大部分变形方法与物体的表示有密切的关系，如通过移动物体的顶点或控制顶点来对物体进行变形。为了使变形方法能很好地结合到造型和动画系统中，近 10 年来，人们提出了许多与物体表示无关的变形方法。

与物体表示无关的变形方法既可作用于多边形表示的物体，又可作用于参数曲面表示的物体。Barr 提出的整体和局部变形方法是这方面最早的工作<sup>[5]</sup>，Watt 等拓展了 Barr 的曲线的定义范围，金小刚等提出了一种统一、有效的整体变形控制方法<sup>[6]</sup>。与物体表示无关的另一种变形方法为自由变形方法 FFD<sup>[7]</sup>，FFD 方法不对物体直接进行变形，而是对物体所嵌入的空间进行变形，Borrel 提出了空间变形的简单约束变形法<sup>[8]</sup>。

### 1.2.3 过程动画

过程动画是指用一个过程去控制物体的动画。过程动画经常牵涉到物体的变形，但与前面所讨论的变形物体的动画不一样。在变形物体的动画中，物体的形变是任意的，可由动画师任意控制；在过程动画中，物体的变形则基于一定的数学模型或物理规律。Reeves 提出的粒子系统是过程动画的较早研究，他于 1983 年发表的论文中提出了一种模拟不规则模糊物体的景物生成系统<sup>[9]</sup>，粒子系统已经成功地模拟了电影“Star Trek II: The Wrath of Khan”中的一系列特技镜头。粒子系统的主要优点是数据库放大的功能。例如，Reeves 声称用 3 个基本的描述便可生成由百万个粒子构成的森林景色，粒子系统还可模拟由风引起的泡沫和溅水的动画。

最近几年，布料动画成了人们感兴趣的研究课题，布料动画的一个特殊应用领域为时装设计，它将改变传统的服装设计过程，可让人们在衣服做好之前看到服装的式样和试穿后的形态。Weil 提出了一种基于几何的布料物体造型方法<sup>[10]</sup>，基于几何的方法不考虑布料的质量、弹性系数等物理因素，因而很难逼真地生成布料的动画。近几年，研究者们更多地用基于物理的方法去模拟。基于弹性理论，Terzopoulos 等提出了一种控制变形曲面运动的方法<sup>[11]</sup>，并用来模拟旗帜的飘动和地毯的附落过程。Carigan 等扩展了 Terzopoulos 的方法，很好地模拟了一个穿着衣服的演员的动画<sup>[12]</sup>。Breen 认为布由一系列线穿梭的交驻点构成，根据“interacting particle”方法，提出了一个丝织布料的理论模型，很好地模拟了布的悬挂效果，他还模拟了由某种特定的纤维编织成的布放于别的物体上的形态<sup>[13]</sup>。

### 1.2.4 关节动画和人体动画

计算机动画在广告、娱乐、教育和仿真等领域占据越来越重要的地位，但人体和动物动画的许多问题仍未很好解决，在三维计算机动画中，把人体作为其中的角色一直是研究者感兴趣的目标，因而关节动画越来越成为人们致力解决的研究课题。

正向或逆向运动学是设置关节动画的有效方法。通过对关节旋转角设置关键帧，得到相关联的各个肢体的位置，这种方法一般称为正向运动学方法。对于一个具有多年经验的专家级动画师来说，能够用正向运动学方法生成非常逼真的运动，但对于一个普通的动画师来说，通过设置各个关节的关键帧来产生逼真的运动是非常困难的。一种实用的解决方法是通过实时输入设备记录真人的各关节的空间运动数据。由于生成的运动基本上是真人运动的复制品，因而效果非常逼真，且能生成许多复杂的运动。Witkin 通过混合运动参数曲线来编辑捕获动画，从而使建立可重用的运动库存成为可能<sup>[14]</sup>。逆运动学方法在一定程度上减轻了正运动学方法的繁琐工作，用户通过指定末端关节的位置，计算机自动计算出各中间关节的位置。Isaacs 等人提出的动力学运动学系统具有与以前不同的 3 个特色<sup>[15]</sup>：①把传统的关键帧系统嵌入到动力学分析中作为运动学约束；②能够定义行为函数以对周围的环境起反应；③用逆动力学来决定产生特定运动的力。Isaacs 把运动学和动力学约束显式表达出来，然后求解这些方程，但计算量极大。

在脸部表情的动画模拟方面，较早的方法是用数字化仪将人脸的各种表情输入到计算机中，然后用这些表情的线性组合来产生新的脸部表情，这种方法的缺点是缺乏灵活性，不能模拟表情的细微变化。Waters 提出了一个基于 facial action coding system 的脸部表情模拟方法<sup>[16]</sup>，该方法由一个肌肉参数模型组成，人的脸用多边形网格来表示，并用肌肉向量来控制人脸的变形。Reeves 提出了一种通过高层的宏肌肉控制低层肌肉的方法，宏肌肉由一系列低层的肌肉组成，每一块低层的肌肉赋以权，宏肌肉收缩引起低层肌肉按某种加权形式收缩。

### 1.2.5 基于物理模型的动画

基于物理模型的动画技术是 20 世纪 80 年代后期发展起来的一项新技术，尽管该技术比传统动画技术的计算复杂度要高得多，但它能逼真地模拟各种自然物理现象，这是基于几何的传统动画生成技术所无法比拟的。基于物理模型的动画技术考虑了物体在真实世界中的属性，如它具有质量、转动惯量、弹性、摩擦力等，并采用动力学原理来自动产生物体的运动。这种方法将动画师从许多低水平的具体运动细节中解放出来，这在制作被动运动（指无生命物体的运动）的动画

时效果尤其显著——动画师只需提供物体的初始状态，物理仿真器会通过源于牛顿定律的不同方程的组合自动地计算它的运动。基于物理的控制技术分为两种方法：基于约束的方法和运动合成法。

基于约束的方法包括对动画物体运动的运动学的约束<sup>[17]</sup>。例如，可以限制模型某个部分的运动轨迹，以使之遵循用户规定的路线。有两种技术可用来计算满足约束的运动：逆动力学技术和约束优化技术。

运动合成法将自然动物的肌肉组织作为一组执行机构进行合成，可以驱使动物的动力学模型产生运动，使动物的运动看起来更加逼真。不像逆动力学技术，运动合成法能将真实肌肉的限制考虑进去；也不像约束优化技术，它能保证永不违反物理规律。同时，运动合成法还允许将传感器纳入动画物体的模型中，建立感觉控制耦合或闭环控制。这样，动画对象就能够自动地应付复杂的自然环境。由于这种方法能够模仿真实肌肉作为执行机构，因此它能够模仿真实动物肌肉的控制模式，来合成人工动物的各种运动方式，其效果当然依赖于有关生物力学结构建模的保真度。采用运动合成法，动画师对动画过程的直接控制比采用基于约束的方法可以更少。有的研究者已经将运动合成法成功地应用在动画制作中了<sup>[18~23]</sup>。

### 1.2.6 智能动画

近些年，研究者们开始研究智能动画技术，目前这方面的研究主要分为自然语言指令驱动的动画、基于知识驱动的动画、基于脚本语言的动画以及行为动画等。

#### 1. 自然语言指令驱动的动画

自然语言指令驱动的动画技术是研究如何由自然语言指令和其他高级任务规范说明来产生虚拟人类 Agent，完成任务的动画模拟。我国的许多研究者在这方面做了大量的工作。微软的 Persona 项目<sup>[24]</sup>致力于产生能够和用户进行自然语音对话的拟人化的动画角色，采用拟人化的对话机制，角色说话时还配合有动作。美国海军研究室的 Nautilus 项目<sup>[25]</sup>致力于研究面向浸入式虚拟现实环境的自然语言和语音理解界面，通过使用口头命令，用户可以在模拟的三维环境中漫游、移动或隐藏虚拟物体、控制模拟回放等。美国宾州大学的 AnimNL (animation from natural language instructions) 项目<sup>[26]</sup>的目标是生成真实的动画，来表现人执行自然语言指令所说明的任务的过程，其功能流程包括自然语言语法分析、语义分析、规划推理、模拟和人物动画。AnimNL 支持对指令的语义和语用理解，以及这种理解随着动作的演化；AnimNL 所生成的动画不仅包括人的一般肢体动作，还有人的面部表情、手势和语音合成，并且提供了各种知识库以支持各部分的功能。

## 2. 基于知识驱动的动画

基于知识驱动的动画是较为常用和有效的一类方法。Mohamed 等<sup>[27]</sup>研制了一个统一的模型用于使一组人造对象在三维环境内运动,该模型基于一个对运动知识进行知识表达和处理的框架,对于人造物体运动机制的理解有很大的好处。Hans Rilpkema 等<sup>[28]</sup>提出了一种用知识库方式对手抓东西的动作进行高层控制的框架。Haskins<sup>[29]</sup>提出了一个将人的认知及技巧等智能因素融入交互式 Video 动画的系统框架模型,该模型定义了一组规则,程序按照这些规则来检测要产生动作的剧本内容,然后根据所测得的剧本类型调动相应的动作集合来完成动画过程。Sang Mah<sup>[30]</sup>设计了一个用于对行为动画进行知识表达的基于约束的推理系统,在高层的控制上,动画角色的运动反映了其推理过程以及它对周围环境的反应。

我国在此领域也取得了一些研究成果。中国科学院计算所 CAD 实验室提出了一种将知识表达、推理等 AI 技术融入剧本理解、演出计划、运动合成、演员合成和场景绘制等方面的系统框架模型<sup>[31]</sup>。浙江大学 AI 研究所提出了一种基于影像动画设计的知识表达模型<sup>[32]</sup>,对关节体动画的运动进行了系统化的知识表达和推理,包括图形对象的知识表达、运动知识表达和影像知识表达。

基于知识的动画系统有时不够直观,用户需要具有图形学、运动知识理解以及智能推理等方面的专业背景知识和编程经验,因而不适合一般的用户,限制了其应用范围,因此出现了基于脚本语言的动画技术。

## 3. 基于脚本语言的动画

基于脚本语言的动画是一种新的基于人工智能的动画生成技术,即用脚本语言来描述动画角色。脚本为一段用动画或图形语言书写的程序,得到动画的过程就等同于调试脚本的过程。文献 [33] 提出了一个类似 Lisp 编程环境的演员/脚本动画系统 A/SAS (actors/scripts animation system),动画师利用 A/SAS 写出一个类似手写脚本的动画序列,然后通过调试脚本程序自动生成动画。所用的图形基于一个几何物体数据集合和在这些数据之上的几何操作符集合,这两个集合都是可扩展的。操作符在模块化的动画程序结构控制下作用于物体。Perlin 与 Goldberg 开发了一个叫做 Improv 的系统<sup>[34]</sup>,它能够用类英语的脚本,即许多作者定义的规则,去定义动画角色的行为。

中国科学院数学所陆汝钤等在 20 世纪 90 年代就开始从事关于动画脚本自动理解的工作,通过将人工智能和基于知识的方法引进动画生成的全过程,提出了一种新的计算机动画技术——全过程计算机辅助动画自动生成技术<sup>[35]</sup>,即从用自然语言书写的故事开始,直至最终生成动画,每一步都是在计算机辅助下完成的,用到了自然语言理解、故事理解、动画设计和生成、规划、动画知识库、常识处理等多方面的技术。使用这种技术,已经创作出了成功的动画片。

#### 4. 行为动画

1987年, Reynolds 率先提出了鸟群行为动画<sup>[36]</sup>。他的研究受到了 Langton 思想的启发, 他认为鸟类群集的形成并不需要一个领头者, 只需要每只鸟遵循一些局部的相互作用的规则即可, 然后群集现象作为整体模式从个体的局部相互作用中体现出来。他提出了一个集群行为的计算模型, 每只鸟都是一个动画角色, 称为 boid, 每个 boid 采用 3 条行为模式: ①分隔, 尽量避免与邻近伙伴过于拥挤; ②匹配, 尽量与邻近伙伴的平均方向一致; ③吸引, 尽量朝临近伙伴的中心移动。每个 boid 都能根据它对局部环境的感知来决定在给定的时间采取何种行为。动画师不必去描绘每一个 boid 的运动, 有组织的群体运动是各个 boid 行为之间自主的交互作用的结果。

Reynolds 的行为动画模型虽然成功地模拟了群体行为, 但是仅仅考虑了环境刺激驱动机制, 没有建立主体的动机模型, 因此还不能对个体的行为作精确的描述<sup>[37]</sup>。针对这些不足, Maes<sup>[38]</sup>提出了一个分布式的分层行动选择机制“行为选择网”(behavior choice network), 这种模型对某些真实动物的行为选择有重要的意义。Beer 和 Chiel<sup>[39]</sup>为使机器昆虫能进行简单的行为选择, 实现了一个基于神经生态学的人工神经网络系统。

### 1.3 人工生命与广义人工生命

人工生命 (artificial life) 是 20 世纪 80 年代后期国外开始兴起的新学科领域, 也是计算机科学继人工智能之后发展的新的研究方向之一。作为新的计算模型和智能模型, 人工生命的研究在美国、西欧及日本已受到高度重视。我国对人工生命的研究起步较晚, 但现在也逐步受到国家的重视与支持。

人工生命的概念是由美国 Santa Fe 研究所的 Langton 教授首先提出的, 他经过了苦苦的思索, 从当时流行的生命游戏中领悟到了一大类具有生命特征的系统的存在, 初步给出了这种系统的描述, 并命名为“人工生命”。1987 年他在美国的 Los Alamos 召开了第一次人工生命的研讨会, 参加会议的有 160 多位科学家, 他们展示了多种可在电脑上演示的具有生命特征的系统, 以及他们对人工生命的理解。

人工生命是正在迅速发展的、面向 21 世纪的新兴学科, 从它一诞生, 立刻引起了信息科学、生命科学、系统科学、哲学、经济学的研究者们广泛的兴趣。

人工生命是一门新兴的学科, 是生物学与人工科学相结合的科学, 包括物种进化、遗传算法、自组织、自适应、智能体、生命现象模拟、生物与社会、基因工程、人工化学、生命动力学、人工生命哲学、人工生命方法论、算法、人工智能等有关研究课题。它抽象地提取控制生物现象的基本动态原理, 并且通过物理

媒介(如计算机)来模拟生命系统动态发展过程,其科学意义、原理及技术将对人类的未来产生深远的影响。

人工生命不同于常规生物学。它不是用分析的方法,不是用解剖有生命的物种、生物体、器官、肌理、细胞、器官细胞的方法来理解生命。人工生命是用综合的方法来理解生命,即在人工系统中将简单的零部件组合在一起,使之产生类似生命的行为。人工生命的信条是,生命的特征并不存在于单个物质之中,而存在于物质的组合之中。其运作原则是,生命的规律一定是其动力形式的规律,这种规律独立于40亿年前偶然在地球上形成的任何特定的碳化物细节之外。人工生命利用计算机或机器人等媒介来探索生物学领域其他发展的可能性。目前计算机化的人工生命形式已经出现。例如,计算机病毒倍增并感染其他计算机系统且通过内部机制复制就是一例。人工系统显示出类似生命的特性,它们的模拟过程在我们所知的生命发展或进化中起重要作用。

### 1.3.1 人工生命的概念

人工生命就是指人造的生命,而非由碳水化合物有机合成的自然生命。但是,像许多新兴学科一样,人工生命尚无统一的定义,不同的学科、不同的学者可能会有不同的看法。人工生命概念的提出者Langton教授认为:“人工生命是具有自然生命现象的人造系统”<sup>[40~42]</sup>;“人工生命的研究是抽取生物现象中的基本动力学原理,把它运用到其他的物理媒体,如计算机上,使它们接受操纵和检验。除为地球上已知的生命现象(life as we know it)提供新的研究方法外,人工生命还为我们探索可能的生命现象(life as it could be)提供手段。”<sup>[43]</sup>;“人工生命这一领域,从总体上来说,代表了一种尝试,这种尝试更重视生物学中合成理论的作用”<sup>[44]</sup>。Ray认为:“人工生命模型具有足够强大的功能,能帮助人们更好地认识复杂系统,这种模型较之自然系统更容易被操纵、重复和控制。人工生命用非生命的元素去构造生命现象以了解生物学,而不是把自然的生物体分解成小的单元,它是一种综合性的方法而不是还原的方法”<sup>[45,46]</sup>。

概括地讲,人工生命研究那些“具有自然生命特征和生命现象的人造系统的理论模型的生成方法和实现技术”。那什么是“生命特征”、“生命现象”呢?目前,地球上已知的自然生命,包括人、各种动物、植物,有哪些生命现象和生命特征呢?

不同的动物、不同的植物具有各种不同的外观形态,不同的内部构造,不同的行为表现、生理功能、生活习性、栖息环境、生长过程,以及不同的物质存在形式、能量转换方式、信息处理模式等。然而,在“个性”中存在“共性”,从各种不同的自然生命的特征和现象中可以归纳、抽象出自然生命的共同特征和现象,自然生命具有交配繁衍、遗传变异、优胜劣汰的自繁殖、自进化、自寻优的

功能和特性；具有发育成长、学习培训、新陈代谢的自成长、自学习、自组织的过程和性能；具有稳定内部状态、适应外部环境、动态协调平衡的自稳定、自适应、自协调的功能和特性。自然生命都是以蛋白质和碳水化合物为物质基础的受基因控制和支配的生物有机体。此外，自然生命都能进行能量转换和信息交换。凡是具有这些自然生命本质特征的人造系统，都称之为人工生命。

另外，人工生命不仅是具有自然生命特征和现象的人造模型、仿真系统，或是自然生命遗传后代、复制产物，而且人工生命可以延伸、扩展自然生命的功能和特性，是自然生命的改良品种、进化系统。可以认为：“人工生命是自然生命的模拟、延伸与扩展”。

### 1.3.2 人工生命的研究内容

如上所述，作为面向 21 世纪的一门新兴的边缘科学，人工生命研究“具有自然生命特征和现象的人造系统的理论模型生成方法和实现技术”。因为生命并不存在于单个物质中，而是存在于物质的组合中，所以人工生命不只研究人工生物个体，而且研究人工社会和人工生态系统。

目前国际、国内人工生命的研究主要包括以下几个方面：数字生命，数字社会，数字生态环境，人工脑，进化机器人和虚拟生物以及演化算法。

#### 1. 数字生命

所谓“数字生命”专指那些以计算机为工具和媒体、计算机程序为生命个体的人工生命的研究，它试图用计算机来模拟生物学<sup>[47]</sup>。这方面以 Ray 的数字生命世界 Tierra 为代表。

Ray 是一位生物学家、进化论学者，他把生物学上有关机体进化的概念引进到计算机领域，用计算机所提供的资源——RAM 单元、CPU 时间以及操作系统为他的数字生命提供一个生存环境。他设计的数字生命以数字为载体，探索进化过程中所出现的各种现象、规律以及复杂系统的“突现”行为<sup>[48]</sup>。

#### 2. 数字社会

Epstein 和 Robert Axtell 在计算机上创立了一个名为“糖境”数字社会 Sugarscape<sup>[49,50]</sup>。这个人工社会用来研究文化和经济的进化过程。他们认为一个人工社会的计算机模型包含：①一群具有自治能力的行为者；②一个独立的环境；③管理行为者之间、行为者与环境之间以及环境各个不同要素之间相互作用的规则。数字社会的行为者是一个能够随着时间发生变化或者具有适应性的数据结构。每个行为者具有遗传特性、文化特性以及管理它与环境和其他行为者之间的规则。其中，行为者的遗传特性在其生命期间是固定的。数字社会是由各个行为者自我组织形成的，由各个行为者在简单规则的支配下，与人工环境交互作用突现形成的。

### 3. 数字生态环境

挪威的 Keith Downing 提出了名为“欣快区” EUZONE (euphotic zone) 的一个进化的水中虚拟生态环境<sup>[51]</sup>, 目的是提供一个观察生态系统是如何从原始状态进化以及复杂生态系统突现行为的实验手段。它利用具体的物理和化学模型, 结合进化规则建构以碳元素为基础的水中生态环境, 可以观察到低等动物的形体的进化及生存的竞争。EUZONE 具有两个基本过程: 环境的模拟和生物的进化。环境的模拟尽量反映真实世界的物理、化学以及生物之间的相互作用; 生物进化由 GP 和 GA 来实现。

人工生态系统<sup>[52~54]</sup>的研究可以帮助理解自然生态系统的组成, 有利于环境保护。

### 4. 人工脑

日本 ATR 的进化系统部 (evolutionary systems department) 致力于开发新的信息处理系统, 这种系统具有自治能力和创造性, 他们把这样的系统称为“人工脑” (artificial brain)<sup>[55,56]</sup>。人工脑不仅能够自发地形成新的功能, 而且能够自主地形成自身的结构。人工脑的研制者并不想单纯地再现生物大脑的功能和结构, 而是想得到在某些方面优于生物大脑的信息处理系统。

### 5. 进化机器人

传统自律机器人的设计方法是把问题分割成几个功能单元: 感觉, 知觉, 建模, 确定行动方案, 执行任务, 马达控制。然而, 这种层次化的设计方法使得机器人缺乏鲁棒性, 误差一旦产生, 就会沿着它的层次结构传递, 并且各个模块之间缺乏一致性, 对环境的变化反应迟缓。

Brooks 提出基于行为的设计方法<sup>[57,58]</sup>, 此方法在 20 世纪 80 年代中期开始使用, 设计出了比传统设计方法行动更快和更灵活的机器人——进化机器人 (evolutionary robotics)<sup>[59,60]</sup>, 对于同一任务, 其编码的长度可以是传统设计方法的千分之一。进化机器人的操作方式是自主型的, 其定位、移动等是突现形成的, 其“智能”也是由各个并行执行的小过程自组织突现形成的, 并且这样的小过程分散在整个系统中。进化机器人具有比传统机器人更快的速度和更好的灵活性、鲁棒性, 进化算法可以比较容易地植入到这样的系统中, 其硬件、软件的设计以及测试费用都比以前要少。

Floreano 和 Mondada 成功地用 Khepera 机器人实现了一个进化系统<sup>[61]</sup>。1990 年, Pattie Maes 用强化学习策略 (reinforcement learning) 实现了六足 Genghis 机器人的步行协调<sup>[62,63]</sup>。Takashi Gomi 用进化的方法在八足 OCT-1b 机器人上实现了步行协调<sup>[64,65]</sup>。进化机器人是机器人设计的一个新的方向, 它把人工生命的概念和思路引入到这个领域。

## 6. 虚拟生物

人工生命原理以及高级计算机技术的出现使得人们在 20 世纪 90 年代早期开始研究视觉创建过程 (visual creation process)。在 1993~1994 年, Sommereer 和 Mignonneau 介绍了他们的第一个交互式计算机装置 (interactive computer installations) “A-Volve”<sup>[66]</sup>, 访问者可以自己创造人工生物 (人工鱼), 与它们交互作用且看着它们进化。1995 年, 他们又发展出另一个系统 “Phototropy”, 访问者可以通过饲养和使它们繁殖, 与虚拟的昆虫交互作用。1996 年, 他们对虚拟生物的建构模块进行了研究, 观察了简单结构是如何通过遗传操作形成复杂形态的, 开发了遗传操纵器<sup>[67,68]</sup> (genetic manipulator, GENMA), 在这个系统中, 访问者可以创造、操纵和探索人工昆虫的设计和形状。在实时交互式环境 “A-Volve” 中, 访问者可以与在一个充满水的玻璃缸中活动的虚拟生物进行交互作用。这些虚拟生物的形成受到进化规则以及人们创造力的影响。人们可以通过用手指在接触屏上设计任何形状的图形来产生三维的虚拟生物, 这些生物自动 “成活” 并且能够在水中游动。GENMA 可以使人们从微观层次操纵虚拟生物的形成。人工生命的原理以及遗传编程被用于构造生命结构, 这允许人们可以实时地操纵 “虚拟基因”。

涂晓媛<sup>[69,70]</sup>用人工生命的方法进行计算机动画的创作, 利用动物形态、习性和行为模型, 在不需任何 “关键帧” 的情况下, 成功地创作了 “人工鱼”, 用计算机实现了 “人工动物” 共有的基本特征——生物力学、运动、感知和行为。人工鱼具有可变形的由肌肉驱动的鱼体、鱼眼睛, 以及具有行为、感知和运动中心的鱼脑。类似于真鱼, 人工鱼体现了最重要的动物行为的特性, 实现了由感知引导行动的功能。人工鱼能够表现出多种行为: 避障、捕食、逃逸、集群和交配等。人工鱼是有着丰富行为活动的人工生命, 人工生命仿真过程启动后, 人工鱼将按它们自己的意图和对周围环境的感知, 在虚拟的海洋世界中自由徜徉。每条鱼都是独立自主的、有自激发功能的智能体, 既有反射行为、又有主动行为, 既有逼真的个体行为, 又有丰富的群体行为。它们是自主的、适于生活在连续、动态的三维虚拟世界中的虚拟机器鱼<sup>[71,72]</sup>。

## 7. 演化算法

演化算法部分的研究主要是提供具有演化特征的算法, 人工生命研究的重要内容就是进化现象, 遗传算法<sup>[73]</sup>是研究进化现象的重要方法之一。许多新的算法正在研究中。

### 1.3.3 人工生命的基础理论

人工生命研究的基础理论包括自增殖单元自动机、形态形成理论、混沌理论、遗传算法、对策理论, 以及最近十几年发展起来的多 Agent 系统理论等, 下

面分别介绍。

### 1. 自增殖单元自动机

自增殖单元自动机理论可以用作给人工生命以增殖性的通用算法<sup>[74~76]</sup>。该理论的基础内容可以归纳为：使用若干个至少可选取两种以上状态的单元自动机组成系统时，当系统的规模低于临界规模，则自复制装置不可避免地只能制造比自己更小型、更简单的后代；一旦系统过临界规模，则不仅可以自复制，而且有可能制造出比自己更复杂的后代，即程序具有进化的可能性<sup>[77]</sup>。

### 2. 形态形成理论

典型的形态形成系统是 L 系统。L 系统是由美国数学家 Lindenmyer 于 1968 年提出的，它以自动机理论为基础，用符号空间的一个符号序列表示细胞状态，把自动机的状态描述为符号序列的状态空间模型，用状态表中的符号序列来表示状态空间中的状态，通过符号序列的变化描述人工生命的形态生成过程。L 系统可以解析、模拟生物体的自组织、自增殖行为<sup>[78,79]</sup>。

### 3. 混沌理论

上面两种理论是基础理论，是从定义简单状态来生成复杂系统的理论，而混沌理论则是用以说明在自然界绝对法则（熵增大法则，自然界中所有物质都将随着时间进行而增大其混乱程度）下，为什么会存在像生命这样能够进行组织化（有序化）的现象的一种理论<sup>[80,81]</sup>。

### 4. 遗传算法

遗传算法可以认为是一个进化过程（迭代过程），它采用某种编码方式将解空间映射到编码空间，每个编码对应问题的一个解，称为染色体或个体。遗传算法一般通过随机方法确定起始的一群个体，称为种群，在种群中根据适应值或某种竞争机制选择个体，使用各种遗传操作算子产生下一代，如此进化下去，直到满足期望的终止条件。遗传算法是人工生命研究的重要理论基础之一<sup>[82,83]</sup>。

### 5. 对策论

对策论在开发当初是为了把经济社会中变化万千的讨价还价策略用数理方法加以理论化，它的创始人是冯·诺伊曼。现在它已成为运筹学领域的一种优化方法，作为数理规划方法而闻名于世。对策论能够用来分析和推理生命的个体及群体的行为。与自增殖单元自动机理论和 L 系统作为生命行为的基础相比，对策论则是用来建立所生成的人工生命的生态社会的基础。

### 6. 多 Agent 理论

人工生命主要研究的是生命行为特征。多 Agent 系统主要研究自主的智能体之间智能行为的协调，为了一个共同的全局目标、也可能是关于各自的不同目标，共享知识，协作进行问题求解。多 Agent 系统可看作一种自底向上设计的系统，因为在系统中，分散自主的 Agent 首先被设计，然后研究如何完成协作。在