



智能科学技术著作丛书

人工鱼

班晓娟 艾冬梅 陈泓娟 宁淑荣 著



科学出版社

www.sciencep.com

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>

铭浩彩色印装有限公司印刷

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 (BI08)

《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、新产品的发展方向和显著标志。

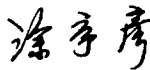
为了适时总结、交流、宣传我国学者在“智能科学技术”领域的研究开发及应用成果,中国人工智能学会与科学出版社合作编辑出版《智能科学技术著作丛书》。需要强调的是,这套丛书将优先出版那些有助于将科学技术转化为生产力

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



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 by 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
第三章 人工鱼设计方案	39
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
第四章 人工鱼的关键技术及动画效果	60
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
第五章 人工鱼的自繁衍理论和方法	89
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
第六章 人工鱼的进化机制和方法	106
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
第七章 人工鱼的自规划模型和方法	118
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
第八章 人工鱼的自学习方法和技术	154
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
第九章 人工鱼群的研究	178
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
第十章 人工鱼的情感研究	209
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