

# 基于人工智能和人工生命的计算机动画<sup>\*</sup>)

张淑军<sup>1,2</sup> 班晓娟<sup>2</sup> 陈勇<sup>1</sup> 陈戈<sup>1</sup>

(中国海洋大学信息科学与工程学院 青岛 266100)<sup>1</sup> (北京科技大学信息工程学院 北京 100083)<sup>2</sup>

**摘要** 基于人工智能(AI)和人工生命(AL)的计算机动画是将 AI 和 AL 应用于计算机动画,从而实现动画的自动生成,减少动画师的参与,让动画角色具备自主性和智能性的计算机动画新方法。本文首先对国内外在这一领域的主要研究内容和成果进行了总结分类,评价了基于 AI 和 AL 的计算机动画较传统动画的特色和优势,继而指出基于 AI/AL 相结合的计算机动画方法是必然发展方向。最后对未来研究趋势作了展望。

**关键词** 计算机动画,人工智能,人工生命

## Computer Animation Based on Artificial Intelligence and Artificial Life

ZHANG Shu-Jun<sup>1,2</sup> BAN Xiao-Juan<sup>2</sup> CHEN Yong<sup>1</sup> CHEN Ge<sup>1</sup>

(College of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100)<sup>1</sup>

(School of Information Engineering, Beijing University of Science & Technology, Beijing 100083)<sup>2</sup>

**Abstract** Computer animation based on artificial intelligence (AI) & artificial life (AL) is a new animation technique which applies AI&AL into computer animation in order to realize animation self-generation, reduce the animators' labor and make animation characters alive with autonomy and intelligence. First, the main research contents and achievements in this field are summarized and categorized. Features and strengths of computer animation based on AI&AL over traditional computer animation are evaluated. Then the viewpoint that computer animation based on AI/AL integration is the necessary developing direction is proposed. Finally, prospects about the future research trends are given.

**Keywords** Computer animation, Artificial intelligence, Artificial life

## 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,其基本含义即通过计算机生成活动的图像。具体来说,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<sup>[1]</sup>。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,应用范围非常广泛。

目前,大多数动画的创作是采用传统的关键帧技术。这种技术虽然也制作了不少优秀的动画作品,但仍有许多不足:动画师劳动量大,成本高,费工费时,动画角色预先设定,没有自主性。尤其是在研究比较集中的生物动画如昆虫、爬行动物、鸟类和人类等方面,如果用关键帧技术,图形生物模型的运动只能像二维动画那样费时费力地绘制,没有自主性,也不具备任何智能性和生命特征。因此近些年来,越来越多的学者开始研究如何实现计算机动画的自动生成,产生更为逼真、自然的动画角色,即通过各种方式驱动动画角色的运动和行,让角色活灵活现于动画情境中,成为独立自主的个体。总结来说,主要有两种途径:人工智能(AI: Artificial Intelligence)途径和人工生命(AL: Artificial Life)途径。

将 AI 理论包括知识表达、推理和各种智能算法用于计算机动画,生成动画情节,驱动动画角色,称为基于 AI 的计算机动画方法。AI 的发展至今已经历过很多阶段,也有不同的分支,各种 AI 技术应用于计算机动画中,产生了不同的基

于 AI 的动画方法。本文第 2 节将详述各种具体方法。

AL 是 1987 年由 SFI 的 C. G. Langton<sup>[2]</sup> 提出而创立的新学科。AL 系统是指具有自然生命特征和功能的人造系统,其中的“活体”是指具有生命特征的个体或群体。AL 研究是抽象地提取演化、生命规则等生物现象的基本原理来模拟生命系统的动态发展过程<sup>[3]</sup>。将 AL 应用于计算机动画制作中,使得动画中的人工动物具有生命特征,可以繁衍和进化,在群体基础上突现出生命体的智能行为<sup>[4]</sup>,称此方法为基于 AL 的计算机动画方法。

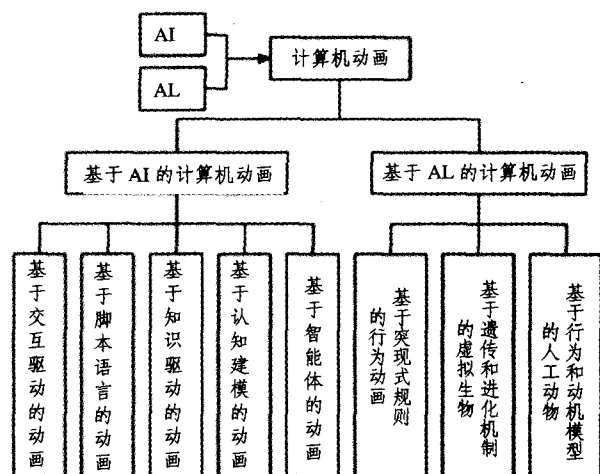


图 1 基于 AI 和基于 AL 的计算机动画的分类

<sup>\*</sup>)国家自然科学基金(60503024);海洋遥感教育部重点实验室开放基金(2005-01)。张淑军 博士研究生。

将 AI 和 AL 用于计算机动画,克服了传统动画技术的缺陷,同时为动画本身增加了很多新的特性。基于 AI 或 AL 方法和技术驱动动画角色,使得动画可以自动生成,减少了动画师的劳动量,节省了动画创作的时间,赋予动画角色智能性和生命特征。基于 AI 和 AL 的计算机动画也是随着 AI 和 AL 领域本身的发展而发展的,从研究方法和技术路线上可以作如图 1 所示的分类。

本文综述了 AI 和 AL 在计算机动画中的应用和研究成果,对各种方法作了对比分析,最后对此方向的研究和发展趋势作了总结和展望。

## 2 基于 AI 的计算机动画

基于 AI 的计算机动画研究如何将 AI 理论和技术用于计算机动画,从而提高动画制作的自动化程度和智能性<sup>[5]</sup>。根据应用的驱动方法不同,可以将基于 AI 的动画分为五类(见图 1 左侧分支树),下面分别对各类予以介绍。

### 2.1 基于交互驱动的动画

即通过跟用户的交互,来驱动动画角色产生动作和行为的动画技术。基于交互驱动的动画有自然语言指令驱动的动画、模拟人类对话、语音、表情的动画等<sup>[6~12]</sup>。

自然语言指令驱动的动画技术研究如何由自然语言指令和其它高级任务规范说明来产生拟人的动画角色,完成动画模拟。这方面国内外做了不少工作。微软的 Persona 项目<sup>[6]</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,角色说话时还有动作相配合。美国海军研究室的 Nautilus 项目<sup>[7]</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>[8]</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,还包括人的面部表情、手势和语音合成等。

美国 MIT 媒体实验室的手势和叙事语言小组一直在研究和构造用于对话的逼真的动画形象<sup>[9~11]</sup>,基于对人类语言、认知和社交能力的深层理解,他们的动画形象能够模拟人类跟用户对话,包括语音、语调、手势、面部表情、头部运动、眼神等。系统的主要特点是多模式输入和多模式输出、实时、命题性和交互性信息的理解与合成及具有诸如转折等对话能力,已经研制出的动画系统有 Avatars、Bodychat 等。

Byrne 系统<sup>[12]</sup>以 RoboCup 模拟器的输出为输入,基于角色的个性、情感状态和比赛情形来产生角色富有感染力的语言和面部表情。Byrne 的输入是关于一场模拟足球比赛的当前状态和最近动作的一系列相关事件描述,每一个事件描述都被预赋一个相关值。Byrne 的主要子系统包括情感生成、情感行为生成、文本和语音标记生成、表情标记生成。Byrne 的一个重要特点是它大量使用了有关语音合成、面部表情和自然语言语义语用处理和生成等的各种系统标准。

### 2.2 基于脚本语言的动画

即用脚本语言来描述角色行为的动画技术。脚本即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<sup>[13]</sup>提出了一个类似 Lisp 编程环境的演员/脚本动画系统(ASAS: Actor/Scriptor Animation System),动画师利用 ASAS 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>[14]</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。

交互式故事也是脚本的一种,通过故事脚本产生动画情节。文<sup>[15]</sup>面向兼顾交互性和情节控制的目标,描述了一个支持交互式情节的动态产生、管理和冲突解决的计算框架,它让用户充当故事的主角来确定当前的行为,同时根据角色的说明、关系、目标等来控制角色的行为。该框架的核心模块是一个情节管理器,它的输入是一系列初始情节条件,输出是角色动作序列,该系统已在网上发布运行。

中科院数学所陆汝钤等在上世纪 90 年代就开始做关于动画脚本自动理解的工作,颇有影响。陆汝钤经过近十年的研究,提出了一套全过程计算机辅助动画生成技术,使计算机能从受限自然语言理解开始,把中文童话故事自动转换成动画片,包括自动执行脚本改编,电影导演和电影摄影的功能,在艺术创造领域内发展了 AI 技术,并体现于他主持研制的软件“天鹅”中,利用“天鹅”已经成功地创作了动画片。该技术能大幅度提高动画片生产效率,并进一步改变动画片生产的面貌。

### 2.3 基于知识驱动的动画

即通过一系列知识和规则驱动角色行为的动画技术。这是较为常用和有效的一类方法。A. S Mohamed<sup>[16]</sup>等人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<sup>[17]</sup>等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。J Haskins<sup>[18]</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>[19]</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>[20]</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>[20]</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。

### 2.4 基于认知建模的动画

即为动画角色建立认知模型(内部世界模型),通过该认知模型来指导角色行为的动画技术。认知模型(cognitive model)定义了角色所知道的知识,这些知识是如何获得的,以及如何用于规划行为。

John Funge<sup>[21,22]</sup>研究了认知建模方法在计算机游戏和动画中的应用,提出在情景演算(situation calculus)中融入感知

信息,采用区间数学(interval arithmetic)表示不确定性(uncertainty),建立自主角色认知模型的新方法,在动态的虚拟世界中,创建能自动获取信息、利用知识进行推理、制定行动规划的智能自主角色。利用认知建模方法 Funge 成功地开发了“史前世界”和“海底世界”(人鱼 Duffy)两个动画。

智能自主图形角色建模是多方面努力的成果,在认知建模思想提出之前,计算机游戏和动画中的角色模型从低到高可以分为几何模型、物理模型、生物力学模型和行为模型,而认知模型的提出使这个角色模型金字塔增加了一个新顶层,如图 2 所示。认知模型通过支配角色的认知,指导角色如何获取知识,如何利用知识去规划行动,从而超越行为模型。

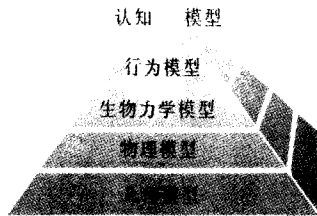


图 2 角色模型金字塔

文[23]提出了一种用人工神经网络来建立认知模型的新技术,同时设计了一种使虚拟角色通过强化学习自动地学习一个未知的行为或认知模型的方法。通过这种方法,虚拟角色能更快、更真实地行为与交互,也提高了动画生成效率,能够在—台 PC 机上实时地驱动上千个智能角色的动画。

### 2.5 基于智能体(Agent)的动画

即将动画角色建模为自主 Agent,运用 Agent 相关理论和机器学习等方法创建动画角色的动画技术。随着 Agent 理论和技术的发展,基于 Agent 的动画角色越来越为大家所欢迎。利用这种方法,图形角色被创作作为类生命的合成 Agent,它们的行为可以用某些学习和适应机制来获得。类生命 Agent 可以持续地监测它们环境的变化并前摄性地展示某些目标行为。

Jack 系统<sup>[24]</sup>为虚拟人 Agent 设计了基于行为控制的行走引擎,力图使用尽量少的行为模拟虚拟人的行走。Lglesias 和 Luengo<sup>[25]</sup>基于 Agent 思想,开发了一个具有三个虚拟演员的动画系统。使用 Amzi! Prolog 语言以及神经网络、模糊逻辑等 AI 算法和思想,并结合 OpenGL 渲染技术,建立了一个复杂的虚拟人动画系统,其中的虚拟演员可以自主决策和行为。

## 3 基于 AL 的计算机动画

AL 是一门新兴的交叉学科,自 1987 年诞生以来得到了科研工作者的广泛重视,其研究范围也越来越广阔。AL 通过模拟生物进化和发育的自适应、自组织,形成了一种图形和动画的自动生成技术<sup>[4]</sup>。AL 和传统计算机动画的结合,促进了计算机行为动画的诞生和发展,创造了一批具有里程碑意义的研究成果。下面按照图 1 右侧给出的基于 AL 的计算机动画的分类进行阐述。

### 3.1 基于突现式规则的行为动画

AL 模拟自然界中自我组织的过程,力图从简单的局部控制出发,让行为从底层突现出来。“突现”(又称为涌现)一词用来指在复杂的(非线性的)形态中许多相对简单的单元彼此相互作用时产生出来的显著的整体特性。将突现思想用于

计算机动画中,产生了一种自动控制角色运动的动画方法,角色能够感知其所在环境,并且按照一些固定的规则来确定其运动,称为行为动画<sup>[26]</sup>。

1987 年,C. Reynolds 率先提出了鸟群行为动画<sup>[27]</sup>。他的研究受到了 Langton 思想的启发,他认为鸟类集群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,然后集群现象作为整体模式从个体的局部相互作用中涌现出来。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 采用三条行为模式:(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。

文[28]在 Reynolds 的鸟群模型基础上,提出了带有约束的鸟群动画,包括点约束、质心约束和形状约束。由动画师指定鸟群的形状(如多边形)作为集群目标,然后通过两个阶段生成动画:首先,寻找能满足约束条件的初始路线集;然后对新的满足约束的动画采样,同时按照行为模型来改进每个角色的路径。

突现是 AL 的重要思想,从纯粹的局部相互作用的规则中突现出秩序和智能,使动画角色可以自组织、自协调。基于突现式规则的行为动画在创建自主、自激发的动画角色方面颇受欢迎,可以有效地减少动画师的劳动,尤其在处理群体动画方面具有独特的优势。

### 3.2 基于遗传和进化机制的虚拟生物

虚拟生物是 AL 和虚拟现实技术相结合应用于计算机图形学和动画的产物,也是当前一个热点的研究方向。虚拟生物处于模拟自然世界物理规律的虚拟环境中,具有可信的外观和行为,它能够接收外部信息,采取行动,并与环境、其他虚拟生物以及人类用户交互。

生命的特征在于自我繁殖、进化<sup>[2]</sup>,遗传和进化是 AL 研究的基本问题。为便于区分,本文将基于遗传和进化机制的计算机动画角色称为(狭义的)“虚拟生物”(virtual creatures),它们具有类生命的特征,但是比较低级。Sims<sup>[29]</sup>创建了一个新颖的虚拟生物进化动画系统,该系统采用遗传算法来自动控制虚拟生物的形态和肌肉神经控制系统,以模拟生物的运动及形态,并通过不同的进化函数来仿真特定行为的进化过程,如游泳、行走及跳跃等。

C. Sommerer 和 L. Mignonneau 于 1995 年开发了一个虚拟生物系统 Phototropy<sup>[30]</sup>,用户可以通过饲养虚拟的昆虫和使其繁殖与虚拟昆虫进行交互。1996 年他们开发了“遗传操纵器”GENMA<sup>[31]</sup>,通过遗传编程来构造生命结构,用户可以通过控制“虚拟基因”来操纵虚拟生物的形成。

### 3.3 基于行为和动机模型的人工动物

将具有行为模型和动机模型的计算机动画角色称为“人工动物”(artificial animals,又作 animats),这样区分,是为了突出人工动物不同于一般的虚拟生物的特性:具有较高级的智能和生命特征,具有形体模型、行为模型及内部动机(意图)模型、能够与其他 animats 和用户实时交互等。

MIT 多媒体实验室开发的虚拟狗 Silas T. Dog 是人工动物的典型代表。Silas T. Dog 生活在人工生命交互视频环境 ALIVE(Artificial Life Interactive Video Environment)<sup>[32,33]</sup>系

统中,该系统采用层次结构组织行为,用户可以直接与虚拟狗进行交互,虚拟狗的行为随着与用户的不断交互而越来越逼真。其行为包括自我兴趣行为、目标驱动的行为以及操作性行为等。

多伦多大学的涂晓媛博士在上世纪90年代初提出的人工鱼(artificial fish)<sup>[34,35]</sup>,是计算机动画的AL方法的成功典范,也是人工动物的代表作。晓媛的鱼是基于生物物理和智能行为模型的计算机动画新技术,是在虚拟海洋中活动的人工鱼社会群体。人工鱼不同于一般的计算机动画鱼之处在于:人工鱼具有AL的特征,具有自然鱼的某些生命特征,如:意图、习性、感知、动作、行为等;人工鱼能自动适应虚拟的水中栖息环境,任何行动都不是由关键帧或剧本预先设置的,而是由其对环境的感知和本身内在的愿望所驱使的。人工鱼根据大脑对其环境状况的判断,由意图产生器产生行动方案。当动画程序初始化时,操作者只需确定画面中出现哪些鱼及它们的初始条件,然后人工鱼将按它们自己的意图自主活动。

北京科技大学的陈泓娟<sup>[36]</sup>和班晓娟<sup>[37]</sup>在晓媛的的基础上做了一定的延伸和扩展,将生命体的繁衍、进化、自学习等特征加入人工鱼角色,展示了人工鱼从出生到成长、繁殖、死亡的生命历程以及人工鱼对环境的适应和学习能力,丰富了其生命特征。

#### 4 对比分析

计算机动画是一个充满挑战和生机的领域,AI和AL在计算机动画中的应用,使计算机动画具备了以前所没有的特色和优势,也面临新的问题和难点。在今后的发展过程中,计算机动画和AI、AL的结合将更加广泛和深入。

##### 4.1 基于AI和AL的计算机动画与传统动画的比较

当前,计算机动画的研究正朝着两个方向发展:一是提高角色的智能;二是着重动作的细腻。动作的细腻即真实感要求主要通过图形学的技术实现;而对于提高角色的智能,则主要通过人工智能、人工生命的途径实现。基于AI和AL的计算机动画与传统的计算机动画相比,具有明显的特色和优势,如表1所示。

表1 基于AI和AL的计算机动画与传统动画的比较

内容	传统动画	基于AI和AL的动画
技术路线	手工劳动,全局控制; 对每个角色的每个动作 细节都必须详细 刻画或规定	动画自动生成; 让每个角色自己 运动和行
动画角色的特点	角色是没有任何自主性 的三维几何图形,好像 没有生命的“木偶”	自激发、自主感知和行 为的角色,具有智能 和生命特征
动画师的参与	关键帧绘制, 劳动量大	不必直接参与,只在高 层指导或设计规则
动画师的作用	相当于“木偶戏表演者”	角色世界中的 “电影摄影师”
效率	低,繁琐	高,便捷
逼真度	往往不够逼真	逼真、自然且可以 实现复杂的动作

基于AI和AL的计算机动画,不仅可以实现逼真复杂的动画,而且为相关的学科,如机器人学科,提供了一个简洁而形象的实验平台,具有感知、运动和行功能的动画角色可以看作是自主、智能的“虚拟机器人”。

##### 4.2 AI和AL的关系

随着学科交叉的发展,各个学科之间的相互应用和影响日益广泛,界限越来越模糊。就AI和AL两个学科而言,二者的关系也在不断的变化和调整当中。从一定程度上可以说,AI是AL的核心和基础,AL是AI的发展和应用<sup>[38]</sup>,因此二者既有其相互重合的部分,也有其各自的特点。表2描述了AI和AL的异同。

研究哲学的Bedau曾很好地总结了许多人的共识<sup>[39]</sup>:大体上讲,AI对于心理学和心智哲学的作用,就是AL对于生物学和生理哲学的作用。AI的重点是研究人的高级复杂性行为,研究认知过程各类计算模型,如推理、记忆和感知;而AL则侧重于研究生命系统的过程特性,如自组织、自繁殖、新陈代谢、突现和进化等,开发对应的计算上可实现的模型。因此,发挥AI和AL各自的优势,创建基于AI和AL相结合的计算机动画,是今后的一个重要发展方向<sup>[40~41]</sup>。

表2 AI与AL的异同

No	AI	AL
1	复杂的人类智能行为	基本自然行为,模拟生命的形成与进化
2	自上而下	自下而上
3	全局控制	局部控制
4	复杂规则	简单规则
5	可编程的行为	突现式的行为
6	知识表示	避免知识表示和规划

**总结与展望** 根据目前国内外在这一领域的研究进展,基于AI和AL的计算机动画主要有如下几个发展趋势:

(1)AI和AL相结合,使动画角色同时具备智能性(如学习、适应能力)和生命特征(繁衍、进化、自组织等),如4.2节所述;

(2)角色建模的完整和丰富;动画角色的建模涉及到多个研究领域,在当前行为建模、认知建模的基础上,加入情感因素,创建更具人性化的动画角色;

(3)通过计算机动画,展示生物完整的生命周期以及生态系统中的宏观和长期现象,如环保、社会性问题,具有科普意义;

(4)计算机动画向虚拟现实和计算机游戏方向发展,增强沉浸感、交互性,实现多层次、多模式的人机交互;

(5)提高动画的质量(真实感效果)和效率,进一步探索和研究更多更便捷的计算机动画自动生成技术。

总之,基于AI和AL的计算机动画是一个内容丰富、具有重要意义的研究领域,AI和AL各自的发展和相互结合,必将会推动计算机动画的发展,计算机动画的水平将不断提高。

#### 参考文献

- 1 金小刚,鲍虎军,彭群生. 计算机动画技术综述[J]. 软件学报, 1997,8(4):241~251
- 2 Langton C G. Artificial life[C]. In: Proceedings of an Interdisciplinary Workshop on the Synthesis and Simulation of Living System, Los Alamos, New Mexico, 1987
- 3 Langton C G. Artificial life[R]. SFI Studies in the sciences of complexity, 1998
- 4 黄文高,潘志庚. 人工生命在计算机图形学中的应用[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2005,17(7):1383~1388
- 5 陆汝钊,张松懋. 从故事到动画片——全过程计算机辅助动画自动生成[J]. 自动化学报, 2002,28(5):321~348
- 6 Lester J C, Converse S A, Kahler S E, et al. The Persona effect: affective impact of animated pedagogical agents[C]. In: Proceed-

- ings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, 1997. 359~366  
<http://www.aic.nrl.navy.mil/~severett/vr.html>
- 7 Badler N I, Webber B, Kalita J, et al. Animation from instructions[J]. In: Badler N I, Barsky B A, Zeltzer D, eds. Make Them Move, SanMateo, CA: Morgan-Kaufmann, 1991. 51~93
  - 8 Vilhjalmsson H, Cassell J. BodyChat: autonomous communicative behaviors in avatars[C]. In: Proc. of the 2nd Annual ACM International Conference on Autonomous Agents, Minneapolis, USA, 1998
  - 9 Cassell J, Bickmore T, Campbell L, et al. Requirements for an architecture for embodied conversational characters[J]. In: Computer Animation and Simulation'99, Vienna, Austria: Springer Verlag, 1999
  - 10 Cassell J. A framework for gesture generation and interpretation [A]. In: Cipolla R, Pentland A, eds. Computer Vision in Human Machine Interaction, Cambridge University Press, 2000
  - 11 Binsted K, Luke S. Character design for soccer commentary[A]. In: Asada M, Kitano H, eds. RoboCup'98: Robot Soccer World Cup II, vol 1604/1999. 22
  - 12 Reynolds C W. Computer animation with scripts and actors[C]. In: Proceedings of the 9th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, 1982. 289~296
  - 13 Perlin K, Goldberg A. Improv: A system for scripting interactive actors in virtual worlds[J]. Computer Graphics, 1996, 29(3): 205~216
  - 14 Sgouros N M. Dynamic generation, management and resolution of interactive plots[J]. Artificial Intelligence, 1999, 107:29~62
  - 15 Mohamed A S, et al. Toward a computational theory for motion understanding: the expert animators model [C]. In: Proc. of Fourth Conference of Artificial Intelligence for Space Applications, 1988. 289~302
  - 16 Rilpkema H, et al. Computer animation of knowledge-based Human GraAPing[J]. ACM Computer Graphics, 1991, 25(4): 12~33
  - 17 Haskins J. The role of expert systems in creating interactive video animation[C]. In: Proc. of moving Towards Experts Systems Globally in the 21st Century, 1994. 1087~1088
  - 18 Mah S, et al. NSAIL PLAN: an experience with constraint based reasoning in planning and animation[C]. In: Proc. of Computer Animation'94, 1994. 83~92
  - 19 劳志强,潘云鹤.基于影像动画设计的知识表达模型[J].计算辅助设计与图形学学报,1998,10(4):367~376
  - 20 Funge J D. 人工智能在计算机游戏和动画中的应用:认知建模方法[M].班晓娟,艾迪明译.清华大学出版社,2004
  - 21 Funge J, Tu Xiaoyuan, Terzopoulos D. Cognitive modeling: knowledge, reasoning and planning for intelligent characters[C]. In: SIGGRAPH 1999, Los Angeles, CA, USA, 1999
  - 22 Dinerstein J, Egbert P K, Garis H, et al. Fast and learnable behavioral and cognitive modeling for virtual character animation[J]. Computer Animation and Virtual Worlds, 2004, 15(2): 95~108
  - 23 Badler N I. Artificial intelligence, natural language and simulation for human animation[C]. In: State-of-the-Art in Computer Animation. Proceedings of Computer Animation '89, 1989. 19~31
  - 24 Lglesias A, Luengo F. A new based-on-artificial-intelligence framework for behavioral animation of virtual actors[C]. In: Proceedings of the International Conference on Computer Graphics, Imaging and Visualization (CGIV'04), 2004. 45~250
  - 25 Wilhelms J, Skinner R. Motion control[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 1990, 10(3): 14~22
  - 26 Flocks R C. Herds and schools: a distributed behavioral model [J]. ACM Computer Graphics, SIGGRAPH, 1987, 21(4): 25~34
  - 27 Anderson N, McDaniel E, Chenney S. Constrained animation of flocks[C]. In: Proceedings of the 2003 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation, 2003
  - 28 Sims K. Evolving virtual creatures[A]. In: Proceedings of SIGGRAPH-1994, Computer Graphics, Annual Conference Series, New York: ACM Press, 1994. 15~22
  - 29 Sommerer C, Mignonneau L. Art as a living system: interactive computer artworks[J]. Leonardo, 1999, 32(3): 165~173
  - 30 Sommerer C, Mignonneau L. GENMA-genetic manipulator[C]. In: Ars Electronica '96: Memesis The Future of Evolution. Wien/New York: Springer Verlag, 1996. 294~295
  - 31 Maes P. Artificial life meets entertainment: interacting with life-like autonomous agents[C]. Special Issue on New Horizons of Commercial and Industrial AI, 1995, 38(11): 108~114
  - 32 Blumberg B, Galyean A. Multi-level direction of autonomous creatures for real-time virtual environments[C]. In: Proceedings of SIGGRAPH95, 1995. 47~54
  - 33 Terzopoulos D, Tu Xiaoyuan, Grzeszczuk R. Artificial fishes: autonomous locomotion, perception, behavior and learning in a simulated physical world[J]. Artificial Life, 1994, 1(4): 327~351
  - 34 Tu X, Terzopoulos D. Artificial fishes: physics, locomotion, perception and behavior[C]. In: Proceedings of SIGGRAPH 94, 1994. 24~29
  - 35 陈泓娟,班晓娟,涂序彦,等.计算机动画的人工生命方法研究——人工鱼的自繁衍模型[J].自动化学报,2003,29(6):986~989
  - 36 Ban Xiaojuan, Ai Dongmei, Zeng Guangping, et al. Computer animation based on artificial life and artificial intelligence: the research of artificial fish[C]. In: 2005 IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control, 2005. 321~325
  - 37 涂序彦.广义人工生命及其应用[J].见:中国人工智能学会第一届“人工生命及应用”专题学术会议论文集《人工生命及应用》.北京邮电大学出版社,2004. 1~13
  - 38 Bedau M A. Philosophical aspects of artificial life[A]. Varela, Cambridge, MA: Radford Books/MIT Press, 1992
  - 39 David K, David R, Pavel N, et al. Intelligent virtual agents. In: Lecture notes in computer science, 2003
  - 40 Dinerstein J. Improving and extending behavioral animation through machine learning[D]. In: Brigham Young University, 2005

(上接第 220 页)

覆盖整数规划问题 (Covering Integer Programming, 简称 CIP), 不难看出能够把本文的方法应用到这种一般情况, 并得到新的结果。

另外, 如果限制 C 中集合至多被选择一次, 就得到约束集合多覆盖问题。这个情况目前最好的近似比是  $\ln n + 1^{[1]}$ 。对简单贪心算法的下界分析表明这个近似比很难改进<sup>[7]</sup>。如何把本文的设计思路应用到这个情况将是一个带有挑战性的课题。

## 参 考 文 献

- 1 Rajagopalan S, Vazirani V V. Primal-Dual RNC approximation algorithms for set cover and covering integer programs. SIAM Journal on Computing, 1999, 28:525~540
- 2 Young N E. Randomized rounding without solving the linear program. Sixth ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms

(SODA 95), 1995. 170~178

- 3 Arora S, Hazan E, Kale S. Multiplicative weights method: a meta-algorithm and its applications, Online Survey. <http://www.cs.princeton.edu/~arora/pubs/MWsurvey.pdf>, 2006
- 4 Littlestone N, Warmuth M K. The weighted majority algorithm. Information and Computation, 1994, 108:212~261
- 5 Koliopoulos S G, Young N E. Approximation algorithms for covering/packing integer programs. Journal of Computer and System Sciences, 2005, 71:495~505
- 6 Srinivasan A. Improved approximations guarantees for packing and covering integer programs. SIAM Journal on Computing, 1999, 29:648~670
- 7 Berman P, DasGupta B, Sontag E. Randomized approximation algorithms for set multicover problems with applications to reverse engineering of protein and gene networks. In: 7th International Workshop on Approximation Algorithms for Combinatorial Optimization Problems (APPROX 2004), LNCS 3122, Springer-Verlag, Berlin, 2004. 39~50