

## \* 学科进展 \*

# “人工生命”研究进展

\*  
张永光

(系统科学研究所 北京 100080)

**摘要** “人工生命”是近十年发展起来的一门新学科。这是一类具有生命特征的系统,是以进化为主要特征的一大类具体的复杂系统。

**关键词** 生命科学, 人工生命, 进化, 复杂性, 系统论

## 1 “人工生命”的诞生

人工生命(Artificial Life)的概念是1987年由美国 Santa Fe Institute (简称 SFI) 教授 C. Langton 首先提出来的。经过苦苦的探索, C. Langton 从当时流行的生命游戏中悟到了一大类具有生命特征的系统的存在性, 初步给出了这种系统的描述并命名为“人工生命”。

十几年来, 这个领域受到了越来越多的关注, 吸引了系统科学、计算机科学、人工智能、控制科学、生物科学、机器人科学、经济学、哲学以及人类学等领域众多的专家学者投入研究。美国、欧洲及日本这方面的研究最为活跃。美国的 SFI 和 MIT(美国麻省理工学院)以及日本的 ATR(日本电器通讯基础技术研究所)有专门的实验室研究人工生命的课题。当前, 主要有三个专门的系列学术研讨会, 一个是 Artificial Life, 从1987年开始美国主办了五次国际研讨会。欧洲很快就响应了这个新领域的挑战, 分别在1991、1993、1995年及1997年召开了四次关于人工生命的研讨会(European Conference on Artificial Life)。日本急起直追, 其特点是把人工生命的研究和进化机器人的研究紧密地结合在一起, 于1996年、1997年、1998年及1999年召开了四次 Artificial Life and Robotics 系列国际研讨会。此外, IEEE 也曾召开内容基本相同的国际会议: Evolutionary Computation 及 Simulation and Adaptive Action Conference。1997年9月在北京举行的“人工生命与进化机器人研讨班”是我国的第一次活动。从上述频繁的国际学术活动, 可以看出该领域研究具有的挑战性和受到的关注。

## 2 “人工生命”研究什么

生物化学家们在实验室里用人工的方法合成出蛋白质, 国外称这种生命为“湿”生命。而系统学家则更重视生命的信息本质。不管是否有蛋白质这种媒体, 如果某个信息过程类似从

---

\* 中国科学院系统科学所研究员, 博士生导师  
收稿日期: 1999年8月5日

DNA 中解码得到基因,而它又控制着整个的信息处理过程,再现生命的某些特征,那么为什么不可以说这也是一种“生命”呢?人工生命的出现就是出于这样的一种考虑。

生命科学是研究生命现象的科学,它以地球上的碳水化合物为基础的生命作为研究对象,在我们生活的地球环境中,只有这样一种以蛋白质为基础的生命形式。生物体,尤其是人体,其结构、功能精妙得令人惊讶。脑、意识、细胞、器官等的行为都吸引人们去探索。生物学告诉我们,生物体具有新陈代谢、遗传、变异、生长、死亡等生命现象,生命系统是一个复杂系统,其整体能出现不同于各个部分的迭加的涌现特性,生命既具有物质代谢过程,同时,也在进行着遗传信息的世代传递,是一个信息的特殊处理过程。

其实,科学家们希望用非蛋白质的媒体表现生命的基本形式已经很久了,当时还不知道 DNA 的秘密。早在 40 年代,杰出的数学家和物理学家 J. Neumann 就开始对机器是否能自我复制这个问题产生了浓厚的兴趣。50 年代, Penrose 就讨论过用机械的方法制造可以自繁殖的机器。人工生命的开拓者试图建构一些生命形式,他们认为蛋白质仅仅是生命的一种载体,生命完全可以采用另外的载体。他们建构的生命形式,其中一部分表现出有新陈代谢、遗传、进化、变异、适应性、生存竞争等生命现象,例如进化论学者 T. Ray 提出的数字生命(Tierra);或者,他们试图把从生命现象得到的启示运用于开辟具有类似于生命特征的复杂的信息处理系统,比如说“人工脑”和“进化机器人”的研究。

C. Langton 认为人工生命是“研究那些具有自然生命现象的人造系统”;“人工生命是这样的一个研究领域:致力于去抽象出生命现象的基本动力学原理,并把这些原理运用到别的媒体(例如计算机),使得它们进入到这些媒体实现操纵和接受检验。除了为地球上已知的生命形式提供新的研究方法外,人工生命允许我们去探索更广泛的可能生命的领域”;“可以说人工生命的整体代表了一种尝试,这种尝试极大地提高了综合性方法在生物学研究中的作用”。T. Ray 也说:“人工生命用非生命的元素去建构生命现象以了解生物学,而不是把自然的生物体分解成各个单元,它是一种综合性方法而不是还原的方法”。

综上所述,人工生命是研究那些具有生命特征的人工系统。实际上,有许多系统符合这种要求,并且这些系统可以进行旨在表现生命系统原理以及组织的实验。同时,人工生命的许多研究致力于理解我们所知道的生命形式,以寻求得到生命形式(并不局限于某种特定的载体)的普遍特征。从这种意义上讲,人工生命的开拓者把地球上的生命仅仅看成是一种具有特定载体(蛋白质)的特定生命形式,地球上的生命进化也仅代表一种特定的进化途径。他们认为可以用别的物质来构造另类载体的生命形式,赋予它们生命的特征,使其具有进化、遗传、变异等生命现象,得到生命的普遍行为。特别需要指出的是,人工生命并非对于生命系统的模拟和仿真。人工生命也是一种生命,只是用不同的载体而已,而载体并不是最重要的。

### 3 人工生命的主要研究领域

从近五年发表的论文来看,当前国际上关于人工生命的研究主要有如下几个方面:

#### 3.1 数字生命的研究

所谓数字生命专指那些以电脑为工具和媒体,电脑程序为生命个体的人工生命的研究。这方面以 T. Ray 的数字生命世界 Tierra 为代表。

T. Ray 把生物学上有关机体进化的概念引进计算机领域,用数字计算机提供的资源(RAM

单元, CPU 时间以及操作系统) 为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。数字生命利用 CPU 时间来组织其在存储单元中的行为。数字生命以一定的计算机程序的形式存在于 RAM 环境之中, 并通过相应的竞争策略为占据 CPU 运行时间、存储空间而相互竞争。一个“生命”必须被设计为适合在这样的环境中生存的某种数字代码程序。这个程序能够自我复制, 并且直接被 CPU 执行, 这些机器代码能够直接触发 CPU 的指令系统以及操作系统的服务程序。通过对资源的占有来体现它在进化过程中的优势地位。

在 Tierra 的运行中, 随着世代的推移, 生命体呈现出复杂的现象, 表现为种类日趋增多, 同时单“细胞”向“多细胞”方式进化, 形成自己的生态环境。在生命的进化过程中, 曾经出现过物种大爆炸的情况, Tierra 的运行在某种程度上表现了物种爆炸的情形, 体现了在一个复杂性剧增的时期都有相应的进化曲线的跃变行为。复杂性的增加还体现在多细胞化的进程当中。如今, Tierra 运行于全球 150 多个网络环境之中, 其复杂程度还在继续增大。同时, 它遵循着遗传和进化的规律, 为考查生物的进化现象和复杂系统的研究提供了一个实验手段。数字生命的研究确实在电脑屏幕上演示出了许多生命的深刻特征。

数字生命研究中的一个重要模型是元胞自动机( Cellular Automata)。一类特殊的二维元胞自动机是布尔网络。其每个元胞都是一个布尔自动机, 即每个元胞状态为 1 或 0, 当元素的连接是随机的且每个自动机的转换函数也是随机确定的时候, 就得到随机布尔网络。随机布尔网络表现出比较复杂的突现行为。A. Kauffman 深入地研究了随机布尔网络。

### 3.2 数字社会

Joshua M. Epstein 和 R. Axtell 在计算机上创立了一个数字社会( Sugarscape)。这个人工社会是用来研究文化和经济的进化过程。他们认为人工社会是一个这样的计算机模型, 它包含: (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。人工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。人工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它行为者之间的规则。其中, 行为者的遗传特性在其生命期间是固定的。

### 3.3 数字生态环境

挪威的 Keith Downing 提出了一个名为 EUZONE( euphotic zone) 的进化的水中虚拟生态环境, 目的是提供一种实验手段, 用以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。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进化及生存竞争。EUZONE 是浮游生物生存的地方, 具有足够的能源进行光合作用。在这个区域, 蓝藻等利用太阳能和别的无机物产生碳水化合物以及蛋白质, 促使水中生物的出现, 形成最低层次的食物链以及大多数别的水中生物的基础。EUZONE 具有两个基本过程: 环境的模拟和生物的进化。前者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。

### 3.4 人工脑

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)”。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。其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。

人工脑采取了两方面的实现方式:(1)类似生命的模型。(2)社会模型,包括传统的用于神经系统的学习模型,如人工神经网络。在类似生命的模型中,系统有一个类似于生命系统胚胎发育的功能,使得系统的结构和组成单元能够发生变化,形成复杂系统。在社会模型中,系统被视为一个动态过程,在这个过程当中,局部的、各个单元之间的连接使得整体的、全局的功能、次序、状态发生突现。反过来,各个单元也受到全局状态的影响。因此,两个方向的相互连接:从宏观到微观,从微观到宏观,影响着系统发生变化。为使系统具备自治和创造性,系统本身须有一些机制以实现在功能和结构上的自发变化。研制者在系统的设计中引入了人工生命中的“进化和突现”的机制。进化被定义为能够产生变化,而突现则是为使系统能适应变化并使系统能按照适应性自我组织。另外,还有一个重要概念是“微观-宏观动力学”,为进化和突现机制提供一个框架。ATR 对于人工脑的建构正在从硬件和软件两方面来推进,硬件的进化是一个极具挑战性的课题,可进化的硬件在目前仍处于开发的初期阶段。大规模的神经网络以及极高的速度要求,需要高容量的存储器以及高速的电子器件。CAM-Brain 项目运用“进化工程”技术来建构/发展/进化出以 RAM 和元胞自动机为基础的人工脑。

### 3.5 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(sensing)、知觉(perception)、建模(modeling)、确定行动方案(planning)、执行任务(task execution)和马达控制(motor control)。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。这样设计出来的机器人并不具备真正的智能,其行为、位置、移动、任务以及操作环境都是预先定义好的,并且速度、质量、力量等需要连续测量,任务及其具体的步骤预先设计并且在执行过程中受到测量监控,其“智能”是由算法来实现的,执行的方式一般都是集中控制。这样的机器人只能完成简单的任务,并且对环境的适应性差,缺乏灵活性。

生物系统给人们提供了分布式控制的思路,其脑神经系统、遗传系统、免疫系统的功能启发了人们把生物学上的一些现象工程化,并且运用到机器人的设计上,其中免疫系统的原理在一些设计中得到了实施。

Rodney A. Brooks 提出了基于行为的设计方法,此方法在 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,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律型的,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。

D. Floreano 和 F. Mondada 成功地用 Khepera 机器人实现了一个进化系统。1990 年, Pattie Maes 用增强学习策略(reinforcement learning)实现六足 Genghis 机器人的步调协调。Takashi Gomi 用进化的方法在八足 OCT-1b 机器人上实现步调协调。进化机器人是机器人设计的一个新方向,它把人工生命的概念和思路引入到这个领域。

### 3.6 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 90 年代早期开始研究视觉创造过程(Visual creation process)。1993—1994 年, Christa Sommereer 和 Laurent Mignonneau 介绍了他们的第一个交互式计算机装置(Interactive computer installations)“A-Volve”, 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, 他们对于虚拟生物的建构模块产生了兴趣, 观察了简单结构是如何通过遗传操作形成复杂形态的, 给出了“GENMA-Genetic Manipulator”, 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。“A-Volve”现在被安装在日本 NHK 大楼。GENMA 可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, 允许人们可以实时地操纵虚拟基因。从一个玻璃盒看进去, 可以发现生物的立体投影, 也可以把手伸进玻璃盒去抓取那些浮游生物。每个生物的遗传编码被显示在一个触摸屏上, 人们可以通过触摸来改变生物的遗传编码, 这样实时地改变生物的外形。选择遗传编码的不同部分进行合并, 可以看到简单的生物是如何产生复杂形式的, 也可以对编码串进行分割和变异操作等等。

### 3.7 演化算法

演化算法研究主要是提供具有演化特征的算法, 遗传算法是其中之一。许多新的算法正在研究中。由于遗传算法的整体搜索策略和优化计算时不依赖于梯度信息, 所以它的应用非常广泛, 尤其适合处理传统搜索方法难以解决的高度复杂的非线性问题。人工生命研究的重要内容就是进化现象, 遗传算法是研究进化现象的重要方法之一。

人工生命与复杂系统的研究是相辅相成的, 而且人工生命的研究本身就是一种复杂性的研究, 并为复杂系统的研究提供了一种实验工具。从上述的介绍中也可以看到, 虚拟世界、人工脑、进化机器人的设计都是基于系统的观点, 强调整体的突现行为。行为者与环境、行为者之间的交互作用, 以及进化、遗传、信息的世代传递, 简单规律出现复杂行为以及复杂性的增加等等, 为复杂系统的研究提供了有效而实际的途径。

### 参考文献

- 1 Waldrop M. 复杂—诞生于秩序与混沌边缘的科学, 三联书店, 1997.
- 2 Ray T S. Evolution, Ecology, and Optimization of Digital Organisms (Seminar/Workshop on Artificial Life and Evolutionary Robots). Beijing. 1997.
- 3 Langton C G. Artificial Life (Volume X of SFI Studies in the Sciences of Complexity), Addison-Wesley, 1992. xiii- xviii.
- 4 王寿云, 于景元, 戴汝为. 开放的复杂巨系统, 浙江科技出版社, 1996.
- 5 成思危主编. 复杂性科学探索, 民主与建设出版社, 1999.