

一个人工生态系统的构建*

撒力^{1,2} 熊范纶² 王儒敬² 丁静^{1,2}

¹(中国科学技术大学 自动化系 合肥 230027)

²(中国科学院合肥智能机械研究所 合肥 230031)

摘要 提出一种基于 Agent 的细胞自动机演化模型,并以天敌害虫捕食现象为例,对农田虫害的演化进行了模拟.它采用自底向上的建模思想,利用 Agent 的局部连接规则,建立复杂生态系统的整体模型.通过建立人工生态系统,并借以进行不同环境下的作物生长及虫害的演化仿真实验,可以作为预测专家系统的辅助工具,为作物病虫害的防治提供科学的决策依据.

关键词 人工生态系统, Agent, 细胞自动机, 虫害

中图法分类号 TP391.9

Agent-Based Artificial Ecosystem Model

SA Li^{1,2}, XIONG Fan-Lun², WANG Ru-Jing², DING Jing^{1,2}

¹(Department of Automation, University of Science and Technology of China, Hefei 230027)

²(The Institute of Intelligent Machines, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031)

ABSTRACT

This paper presents an agent - based Cellular Automata (CA) model. As an example, the relationship between pest and its natural enemy in local agro-ecosystem is modeled and simulated. In this artificial ecosystem, each agent is located in a simulated space of the cellular automata grid, and each iteration of the simulation is based on a parallel update of the agents conforming local rules. Corresponsive results acquired by setting parameters under different condition help to improve the management of agro-ecosystem.

Key Words Artificial Ecosystem, Agent, Cellular Automata(CA), Insect Pests

1 引言

从系统科学的角度来看,许多复杂事物的复杂性是从简单性发展起来的,是在适应环境的过程中产生的^[1].我们可以把农业生态系统看作复杂适应

系统(complex adaptive system, CAS),并对此进行研究^[2].人工生命在复杂性的研究热潮中应运而生.作为人工生命研究的主要对象,对人工生态系统及其理论模型、生成方法与实现技术的研究具有重要意义^[3].

* 国家 863 高技术计划重大专项资助项目(No. 2003AA209020)

收稿日期:2003-11-28;修回日期:2004-07-23

作者简介 撒力,男,1971 年生,博士研究生,主要研究方向为复杂系统、人工生命. E-mail: sali@mail.ustc.edu. 熊范纶,男,1940 年生,研究员,博士生导师,主要研究方向为人工智能、专家系统. 王儒敬,男,1964 年生,研究员,主要研究方向为人工智能. 丁静,女,1971 年生,副教授,博士研究生,主要研究方向为人工智能、知识表示.

目前,对于复杂生态系统研究的一种有效方法是基于 Agent 的建模与仿真方法.它是一种面向对象的仿真方法,可直接模拟组成系统的主体,以及主体与主体之间的相互作用,从而研究系统的整体行为.生态学理论体系认为,生态学应当借鉴生物进化理论,把生态系统作为由智能个体组成的复杂系统进行研究^[1,4].在这种研究方法中组成生态系统的个体被称为生态主体,它具有认知与适应学习能力,简单的个体行为组成了复杂多变的生态景象.基于 Agent 的仿真方法利用人工智能和计算机科学领域的最新研究成果在微观层次上构造生态主体,进而推出由微观个体行为形成的宏观效应.它充分利用 Agent 具有的自治性,使用框架结构可以灵活组合各种不同性质不同构造的主体,以模仿生物的适应能力.在基于 Agent 的仿真中,个体的生命由其行为来表现,而行为是基于规则产生的.因此,这是一种自下而上的研究方法. Agent 和面向 Agent 系统技术已成为人工智能和计算机科学领域发展最快的课题之一^[5].

细胞自动机(Cellular Automata, CA)是研究复杂系统的一种有效手段,被广泛应用于自然科学和社会科学等各个领域^[6,7].它最初是由计算机创始人 J von Neumann 于 20 世纪 40 年代末提出,用来对算法理论和信息理论进行综合研究.同时,CA 也可以用来模拟自然界中生物的生长、繁衍、竞争、进化、遗传等生物现象,是研究生态系统的有力工具^[8,9].生物作为生态系统的主体,其行为具有主观性和随机性,利用 Agent 技术建立细胞自动机模型可以更好的实现对生态系统的模拟^[10].

本文提出一种基于 Agent 的细胞自动机演化模型——Cropland,并采用整体建模仿真的方法,对农田虫害的演化进行模拟.这里,作物、昆虫以及周围环境构成了一个简单的生态系统.

2 Cropland 模型

2.1 CA 建模方法

CA 模型是空间、时间和变量都离散的动力学系统.细胞规则地排列在一维、二维或者三维甚至高维空间.给定细胞的状态数目,限定细胞仅取有限的数目,通常假设其为布尔量.所有细胞在时刻 t 根据一定的演化规则变更自己的状态进入下一个时间步.通常假定每个细胞的状态变化仅仅决定于上一时刻该细胞邻居及其自己的状态情况,即在 $t + \Delta t$ 时刻,一个细胞的状态根据 t 时刻它自己的状态和 t

时刻它邻域细胞的状态而改变.因此,所有细胞状态进行同步变化.半径($R = 3$)时的 Moore 邻域如图 1 所示.

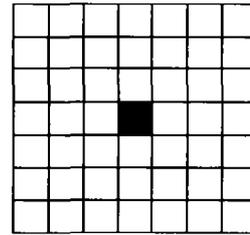


图 1 Moore 邻域($R = 3$)

Fig. 1 Moore neighborhoods($R = 3$)

通过邻域的定义,可以决定该模型是局部信息的还是完全信息的(在几何空间上).由于一般假定本时刻的演化规则仅仅受上时刻状态的影响,因此该信息在时间上也是局部的,当设定本时刻的演化规则决定于以前 n (直至无穷大)个时刻的状态时,在时间上才达到完全信息的要求.显然,细胞自动机模型在一般情况下是自然满足局部信息这个条件的,因此特别适合于对基于局部信息的系统的模拟.但是,仅仅以较少数目的状态和简单划一的演化规则来进行模拟显得过于简单.因此,有必要将细胞自动机的每个细胞进一步设计为一个 Agent,使它具有自己专门的状态设计和演化规则.

2.2 模型描述

Cropland 的基本框架是将生态环境进行均匀的网格划分,用二维的网格表示农田局部生态环境,其中单元格是作物植株个体的生长空间,同时也可以被昆虫个体作为栖息地所占据.但是每个单元格只能被一个昆虫个体占据.这样一块农田就被分成了若干个“细胞”,所有的“细胞”构成了模型建立所依据的细胞空间.

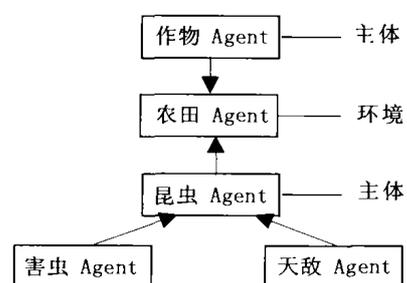


图 2 模型中不同 Agents 的组成关系

Fig. 2 Relationship between different agents in model

模型中设计了三种不同的 Agent,分别是农田

Agent、昆虫 Agent 和作物 Agent,其中,农田 Agent 是昆虫 Agent 的生长演化环境,昆虫 Agent 又分为害虫 Agent 和天敌 Agent. 模型中 Agent 的组成关系见图 2.

昆虫主体依赖于环境而生存,它们从环境中收集资源以获得能量(营养),其中,作物植株是害虫的能量来源,害虫是其天敌的能量来源. 如果其自身能量被耗尽该主体将死亡.

昆虫主体的行为受环境主体的制约,其演化运动遵循一定的局部规则. 模型中每个昆虫主体存在一定的视野,能感知一定范围内的情况. 这里选择 Moore 邻域(半径为 R) 作为模型中昆虫主体的视野,每个昆虫主体当前的行为完全由其视野内的环境决定,并且不同昆虫主体的视野范围不同. 对于害虫 R 取 1,对于天敌 R 取 3.

昆虫主体之间的交互作用是局部的,只能发生在所定义的邻域内. 主体具有一组动态属性并且每天更新. 这些动态属性包括(括号内为变量名):

(1)能量(agentEnergy). 主体的能量以所占资源量的多少来衡量,并达到一极限值. 当主体当前的能量小于或等于 0 时,该主体将死去.

(2)年龄(agentAge). 主体的年龄以天数来记.

(3)位置(x, y). 用来确定主体的移动状态. 主体的当前位置由一组坐标 (x, y) 来表示.

(4)颜色(color). 用以标记主体状态属性的改变并观察主体种群的动态演变.

昆虫主体同时具有一组静态属性,这些属性在其生命周期内不发生变化. 包括

(1)视野(FOV). 主体的视野取决于所定义的邻域半径大小,视野越大,该主体与其它主体或环境的作用越强. 主体的视野范围 $R = 3$ 时,可以看到周围的 48 个细胞格, R 为正整数, $R \ll \min\{X, Y\}$, 具体见图 1.

(2)新陈代谢率(agentMetab). 主体每天消耗的能量.

(3)初始能量(agentInitEnergy). 主体与生俱来的能量.

(4)最大能量(agentMaxEnergy). 主体所能摄入的最大能量,若主体将要摄入的能量会让自己的总能量超过最大能量,主体停止觅食行为.

(5)繁殖年龄(agentReproAge). 主体开始繁殖的年龄. 主体的能量以所占资源量的多少来衡量,并达到一极限值.

(6)繁殖力(agentReproEnergy). 主体繁殖所需的最小能量.

(7)生命周期(agentMaxLife). 主体的最大寿命. 当主体达到其最大寿命时时,该主体将死去.

2.2.1 作物

作物是一个基于 CA 并由用户定义的 Agent 实例,用以模拟作物的生长. 它由 $m \times m$ 维平面网格纵横排列组成,每个网格是一个细胞,代表作物植株个体,并具有有效积温(EAT)属性,在离散的时间步序里随环境变量的不同发生变化,从而模拟植物的不同生长期. 作物 Agent 的生长分为幼苗、分蘖期和成熟期三个阶段,不同阶段害虫 Agent 对其有不同的作用. 不同生长期的作物抵御虫害的侵食力有强弱之分:处于幼苗期的格点被害虫两次占据时,将产生病变;处于分蘖期的格点被害虫一次占据时,即产生病变;而处于成熟期的格点被害虫占据时不产生病变. 作物 Agent 具有以下属性(括号内是变量名):

环境温度(levelOfTemperature),模型运行前设置;

环境湿度(levelOfHumidity),模型运行前设置;

有效积温(levelOfEAT),当前作物的生长参数.

2.2.2 害虫

害虫的生长繁殖受环境温度和湿度变化的影响,同时也受到天敌的抑制. 害虫随环境有效积温(EAT)的增加而繁殖生长,到达一定寿命后死亡. 害虫只在局部范围内相互影响,邻域之外的个体间不产生全局性作用.

每个时间步害虫按照如下规则产生位置变化:

Rule 1: 观察

If 邻域内某个方向上网格中有天敌

Then goto Rule 2

Else goto Rule 3

Rule 2: 逃避

If 相反方向上网格为空

Then 向该网格移动

Else goto Rule 4

Rule 3: 觅食

If 邻域内某个方向上网格中有植株个体

Then 移向该网格

Else goto Rule 4

Rule 4: 移动

If 邻域内网格为空

Then 向该网格移动

Else 原地等待

2.2.3 天敌

天敌在每个时间步按如下规则产生位置变化:

Rule 1: 观察

If 邻域内网格为非空 and 被其它同伴占据

Then 原地等待

Else goto Rule 2

Rule 2: 觅食

If 邻域内网格中有害虫

Then 移向该网格

Else goto Rule 3

Rule 3: 移动

If 邻域内网格为空

Then 向该网格移动

Else 原地等待

2.3 模型实现

采用面向对象的方法,用 Java 编程,在 PC 机上初步实现了对农田虫害的演化模拟,运行结果用图形加以显示. Java 的面向对象思想适合将 Agent 作为一个整体的思路. Java 语言的动态类自动装载机制、对象的序列化与反序列化机制特别有利于 Agent 的代码迁移和持久性保存.

表 1 CROPLAND 模型结构

Table 1 Configuration of CROPLAND

CROPLAND	Main 文件(主程序)
模型	定义主体 Agent 的文件 定义模型 CROPLAND 文件

模型结构由三个组成部分(表 1),其中 Main 文件为 StartPest. java,是系统模型的核心文件,其包含的方法及功能如下:

InitSwarm(),初始化整个模型;

buildObjects(),建立模型对象,图形用户界面 GUI

对象;

buildActions(),调用 buildAction()方法,建立行为列表;

activateIn(),激活模型,建立系统仿真程序的运行环境;

go(),启动模型;

drop(),释放所有对象,返回.

模型文件有两个:JpestModelSwarm. java,根据上述规则算法进行模拟;JPestObserverSwarm. java,对模拟过程进行跟踪并显示.所包含的主要方法及功能如下:

buildObjects(),创建模型所需各类对象;

buildActions(),创建模型中主体的行为列表;

activateIn(),指定模型运行环境(在 Main 文件中建立的环境之内),对其进行封装.

JpestModelSwarm. java 还包括:

pestDeath(), pestBirth(), countPests(), getAraneidList()和 getPestList()等方法,用于系统种群演化以及结果统计输出.

Agent 文件是模拟主体,属于不同的 Agent 类,包括 Cropland. java, Pest. java, Araneid. java,它们构成了模型 CROPLAND 文件的基础.

2.4 模拟实验

利用所建立系统模型对 Lotka-Volterra 模型的捕食现象进行了实验模拟.这里考虑害虫的控制问题,在害虫生长季节的开始就引入害虫的天敌,这样害虫与天敌的相互作用模型就是一个捕食—被捕食模型.

模拟实验中,取二维细胞网格的大小(world-Size)为 100×100 .模型中,整个环境及主体以二维光栅图加以显示(图 3),模型参数如表 2 所示.

图 3 和图 4 分别是系统状态图及种群变化图.

表 2 模型参数设置

Table 2 Model parameters

Attribute	ReproEnergy	Metab	ReproAge	MaxLife	FOV	MaxDensity
Prey	15	3	12	6	1	0.02
Preyer	30	5	20	8	3	0.01

2.5 结果分析

Lotka-Volterra 模型是一个经典的生态模型,是由 A J Lotka 和 V Volterra 在 20 世纪 20 年代提出的,其数学表达式如下:

$$\frac{dx}{dy} = x[a_1 + b_1x + c_1y], \quad \frac{dx}{dy} = x[a_2 + b_2x + c_2y].$$

其中, x 、 y 的系数均为常数, b_1 与 c_1 分别反映两种群的密度作用因素,称为种内作用系数; c_2 与 b_2 反映了两种群相互作用的因素,称为种间作用系数; a_1 与 b_2 分别表示两种群的内禀增长率.捕食与被捕食

中, 一种群充当另一种群的食饵, 此时 $c_1 \cdot b_2 < 0$. 捕食者 y 仅以 x 为生.

在一定的资源环境下, 被捕食种群 Insect 1 在演化初期不断增长, 在到达一峰值后开始下降, 直至完全消失; 而捕食种群 Insect 2 先是缓慢增长, 在种群 Insect 1 开始下降的同时种群 Insect 2 增长加快, 并在接近环境承载量后也趋于稳定. 可以看出, 在这种捕食—被捕食关系的演变中, 害虫种群得到有效控制.



图 3 系统状态图

Fig. 3 State Graph of System

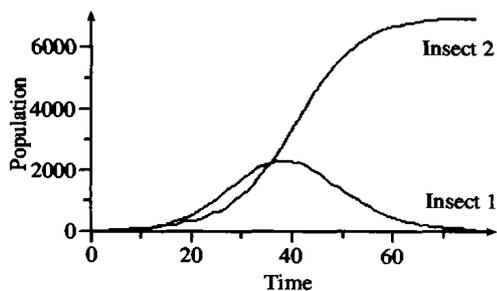


图 4 系统种群变化图

Fig. 4 Population Graphs of System

3 结束语

本文基于复杂适应系统(CAS)理论, 结合细胞自动机模型和计算机仿真技术, 建立了一个人工生态系统, 并以天敌害虫捕食现象为例进行了模拟实

验, 它采用自底向上的建模思想, 利用 Agent 的局部连接规则, 建立复杂系统的整体模型. 通过建立生态系统模型并进行仿真实验得到相关数据, 从而对复杂的农田生态进行有效的分析研究, 是实现虫害田间管理的必要手段. 针对不同环境条件设定相应的仿真参数, 可以得到恰当的害虫种群演化结果, 有助于农田生态管理的科学决策.

参 考 文 献

- [1] Zhang Z B, Wang Z W, Li D M. Ecological Complexity—Review and Prospect. *Acta Ecologica Sinica*, 1998, 18(4): 433–441 (in Chinese)
(张知彬, 王祖望, 李典谟. 生态复杂性研究——综述与展望. *生态学报*, 1998, 18(4): 433–441)
- [2] Holland J H, Miller J H. *Artificial Adaptive Agents and Economic Theory*. *American Economic Review*, 1991, 81(2): 365–370
- [3] Langton C G. *Artificial Life*. In: Langton C G, ed. *Artificial Life*. Redwood City, USA: Addison Wesley, 1989
- [4] Dangles D L, Louis J G. *Individual-Based Models and Approaches in Ecology*. New York, USA: Chapman & Hall, 1992
- [5] Sa L, Xiong F L. A Multi-Agent Based Cellular Automata Model of Agro-Ecosystem. In: *Proc of the 5th International Workshop on Artificial Intelligence Agriculture*. Cairo, Egypt, 2004, 57–62
- [6] Wang J H, Qi G Z. The Method for Simulating Life System by Using Cellular Automata Model. *Guizhou Science*, 2000, 18(3): 161–165 (in Chinese)
(王季槐, 戚国正. 模拟生命系统的细胞自动机建模方法. *贵州科学*, 2000, 18(3): 161–165)
- [7] Balzter H, Braun P W, Kohler W. Cellular Automata Models for Vegetation Dynamics. *Ecological Modeling*, 1998, 107(2–3), 113–125
- [8] Olson R L, Sequeira R A. Emergent Computation and the Modeling and Management of Ecological Systems. *Computers and Electronics in Agriculture*, 1995, 12(3): 183–209
- [9] Gessler N. Growing Artificial Societies—Social Science from the Bottom Up. *Artificial Life*, 1997, 3: 237–242
- [10] William C P, Paul W B, Knowlton F F. An Individual-Based Model of Canid Populations: Modeling Territoriality and Social Structure. *Ecological Modeling*, 2003, 166(1–2): 109–121