

粒子群 算法及其应用

段晓东 王存睿 刘向东 编著

Particle Swarm Optimization
and Application



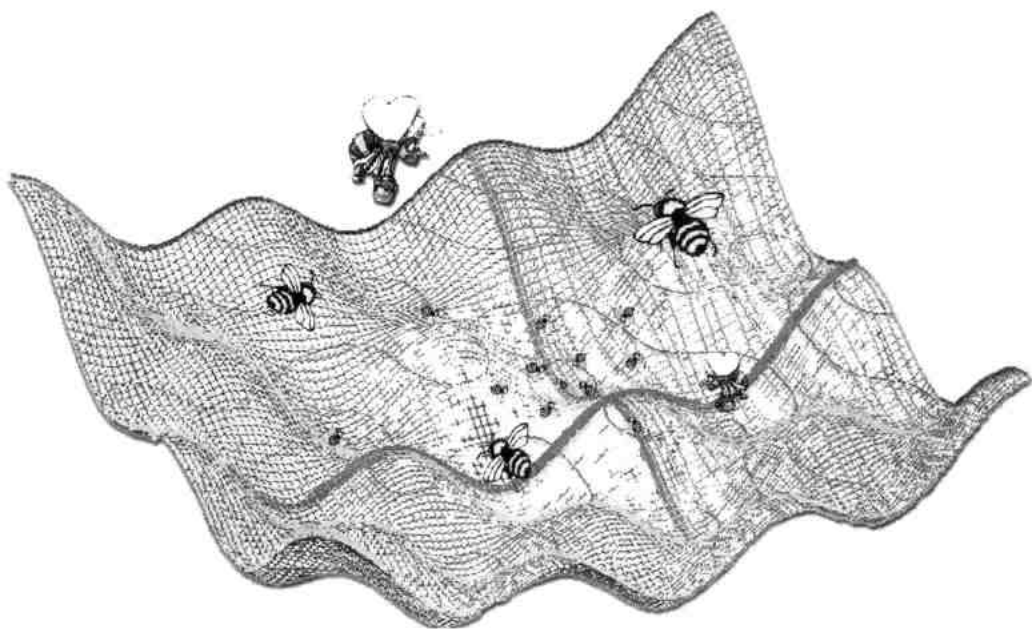
辽宁大学出版社

粒子群

算法及其应用

段晓东 王存睿 刘向东 编著

Particle Swarm Optimization
and Application



辽宁大学出版社

© 段晓东 王存睿 刘向东 2007

图书在版编目 (CIP) 数据

粒子群算法及其应用/段晓东, 王存睿, 刘向东编著. —沈阳: 辽宁大学出版社, 2007.12

ISBN 978-7-5610-4743-9

I. 粒… II. ①段… ②王… ③刘… III. 电子计算机—算法理论—高等学校—教材 IV. TP301.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 125084 号

出 版 者: 辽宁大学出版社

(地址: 沈阳市皇姑区崇山中路 66 号 邮政编码: 110036)

印 刷 者: 抚顺光辉彩色广告印刷有限公司

发 行 者: 辽宁大学出版社

幅面尺寸: 175mm × 245mm

印 张: 17

字 数: 330 千字

出版时间: 2007 年 12 月第 1 版

印刷时间: 2007 年 12 月第 1 次印刷

责任编辑: 刘 葵

封面设计: 邹本忠

版式设计: 程 丽

责任校对: 齐 月

书 号: ISBN 978-7-5610-4743-9

定 价: 38.00 元

联系电话: 024-86864613

邮购热线: 024-86851850

网 址: <http://press.lnu.edu.cn>

电子邮件: Lnupress@vip.163.com

内 容 简 介

粒子群算法(Particle Swarm Optimization, 简称为 PSO)不仅仅是一种高效的优化计算技术,其中也蕴含群体进化所形成的复杂生存策略和学习机制。首先,从鸟群行为规律和人类社会学习理论等方面系统地论述了粒子群算法的学习机制和信息利用策略;其次,系统地介绍了多种群协作和保持群体多样性等算法改进机制与粒子群算法的融合模型。

在粒子群算法的工程应用领域,本书较详细地讲述了算法在约束优化、多目标优化和组合优化中的学习策略和编码方案,同时给出了粒子群算法在数据挖掘诸多领域的应用实例,如神经网络训练、分类器设计、聚类分析和网络社区发现等,并给出了详细的代码设计。

本书适合高等院校高年级本科生、研究生阅读,也可供研究群智能理论的有关人员参考。

前言

生命个体完美而精妙,而由个体组成的群体也是绚烂多姿。几百万年前,人类就学会了群体狩猎;十几万年前,人类逐渐形成了社会,进而产生了社会分工。与此同时,我们认为是低等生物的群体也建立起了庞大的“组织”,“协作”应对复杂问题。在研究自然界这些生物群体行为时,人们会惊奇地发现,生物群体系统所拥有的鲁棒性和应对复杂问题的能力,往往是依靠一套在个体间和个体与环境间的交互规则来完成的。例如,一群看似简单的蜜蜂,却能造出精美的蜂巢;鸟群在没有集中控制的情况下能够同步飞行;单只蚂蚁的能力极其有限,但当这些简单的蚂蚁组成蚁群时,却能够完成筑巢、觅食等复杂行为。这种在生物群体内个体通过信息交换,改变自身的一些行为模式进而很快适应群体变化的特质,就使得群体“表现”出非凡的自组织行为,或者说“涌现”出某种智能。这样的现象既吸引了仿生学家们的注意,同时也给计算机科学、数学等相关领域的学者带来启示。自 20 世纪 80 年代开始,人们从模拟生物进化的机理出发,提出了包括遗传算法、进化规划、进化策略等在内的用于解决复杂问题的新方法,称之为进化计算(Evolution Computation,简称为 EC)。同样的,通过模拟生物群体由聚集协同进而表现出智能的方法称为群智能(Swarm Intelligence,简称为 SI)方法。

粒子群算法(Particle Swarm Optimization,简称为 PSO)是群智能的重要分支之一,它是受鸟群、鱼群等生物群落的防御、猎食行为中的搜索策略启发而形成的,由美国学者 Kennedy 和 Eberhart 在 1995 年提出。它收敛速度快,需设置参数少,近年来已在函数优化、神经网络训练、模式分类、模糊系统控制以及其他工程领域得到了广泛的应用,并受到学术界的广泛关注。

本书内容是在参阅国内外有关 PSO 的文献基础上,结合我们近期的相关研究工作综合而成。书中介绍了各种粒子群算法的理论,而且从不同角度阐述了各种算法的思想和相关的背景以及在各种工程领域中的应用。书中涉及到我们的工作主要有基于参数的 PSO 算法改进研究、粒子种群多样性与种群结构关系研究、PSO 算法与遗传算法的融合研究以及粒子群算法在数据挖掘分类器设计和 Web 社区发现等方面的应用研究等。这些研究内容有的已经在国际、国内学术会议上进行交流,有的已在相关学术期刊上发表。研究成果的获得是课题组全体同事和研究生们几年来共同努力的结果,特别是研究生高红霞、田晓东、王楠楠和徐平等也参与了这本书的部分工作,并为此作出了贡献。

本书的出版得到了教育部优秀青年教师资助计划(教人司[2003]355 号文)、国家自然科学基金(60573124)和辽宁省自然科学基金的资助。书中引用了大量文献资料,在此向原作者表示深深的谢意。群智能以及粒子群算法的研究工作毕竟尚处于发展中,有许多内容还有待进一步研究与完善,为此,书中错误和不妥之处在所难免,肯望不吝赐教指正。

作 者

2007 年 11 月于红梅园

目
录

第 1 章 绪论	1
1.1 群智能概述	2
1.2 群智能仿真	3
1.2.1 群体生物行为的复杂性	3
1.2.2 生物群体行为的仿真	6
1.2.3 基于 Agent 的系统模型仿真	7
1.3 群智能计算	8
1.3.1 蚁群算法	9
1.3.2 粒子群算法简介	11
1.4 本书的组织	12
参考文献	14
第 2 章 基本粒子群算法及其起源	17
2.1 粒子系统	17
2.2 从鸟群行为规律到粒子群算法	20
2.3 由社会认知心理学到粒子群算法	23
2.4 由演化计算衍生粒子群算法	26
2.5 基本粒子群算法	29
2.5.1 粒子群算法的行为参数设置	30
2.5.2 基本粒子群算法的算法流程	33
2.5.3 粒子群简单实例及算法实现	33
参考文献	40
第 3 章 粒子群算法的改进	42
3.1 参数改进型粒子群算法	42
3.1.1 惯性因子改进模型	42

3.1.2	收敛性分析及收敛因子	43
3.1.3	具有时变加速因子的自组织粒子群算法	49
3.1.4	信息结构与中值粒子群算法	52
3.2	基于模式结构的改进算法	56
3.2.1	不同拓扑结构改进型粒子群算法	57
3.2.2	社会分工粒子群算法	58
3.2.3	协同粒子群算法	60
3.2.4	自然选择粒子群算法	61
3.2.5	动态系统自适应粒子群算法	61
3.2.6	全连通粒子群算法	62
3.3	基于种群多样性的改进算法	67
3.3.1	基于种群熵的自适应粒子群算法	67
3.3.2	不同种群结构的描述	72
3.3.3	种群多样性与种群结构的关系	74
3.4	全局算法	77
3.4.1	序列生境技术	77
3.4.2	函数延伸	80
3.5	离散粒子群算法	81
3.6	并行粒子群算法	81
3.6.1	主从式并行粒子群模型	81
3.6.2	孤岛型并行粒子群模型	84
3.6.3	元胞结构并行粒子群模型	85
3.6.4	并行模型的复杂度分析	86
3.6.5	并行算法模型的可扩展性	87
3.6.6	元胞并行粒子群模型收敛分析	88
	参考文献	89
第4章	粒子群算法与优化计算	92
4.1	最优化问题	92
4.1.1	函数优化问题	93
4.1.2	组合优化问题	94
4.1.3	邻域函数与局部搜索	95
4.1.4	优化中的 No Free Lunch 理论	96
4.2	约束优化问题	97
4.2.1	惩罚函数	98
4.2.2	粒子群算法求解约束优化	103

4.3 粒子群算法与多目标规划	105
4.3.1 多目标优化问题描述	105
4.3.2 非支配解	106
4.3.3 偏好结构	107
4.3.4 基本求解方法	108
4.3.5 问题的结构和特性	111
4.3.6 多目标规划的粒子群求解	111
4.4 粒子群算法在组合优化中的应用	117
4.4.1 旅行商问题	117
4.4.2 最小生成树问题	120
参考文献	126
第5章 粒子群算法同其他仿生算法的融合	130
5.1 粒子群算法与神经网络方法的融合	130
5.1.1 人工神经网络模型	131
5.1.2 基于粒子群算法的神经网络训练算法	137
5.1.3 粒子群算法与神经网络融合的其他应用	140
5.2 粒子群算法与遗传算法的融合	145
5.2.1 遗传算法简介	145
5.2.2 带交叉和子群的混合粒子群算法	145
5.2.3 基于粒子群的混合遗传算法	146
5.3 粒子群算法与其他仿生算法的比较	152
5.3.1 算法的相同点	152
5.3.2 算法的差异	153
参考文献	155
第6章 粒子群算法在数据挖掘中的应用	157
6.1 数据挖掘功能及方法	157
6.1.1 数据挖掘功能	158
6.1.2 数据挖掘方法	163
6.2 粒子群算法在数据分类中的应用	165
6.2.1 数据分类的主要分类算法	165
6.2.2 基于粒子群算法的分类规则挖掘	174
6.3 粒子群算法在数据聚类中的应用	182
6.3.1 聚类算法的分类	182
6.3.2 典型的划分方法	183
6.3.3 基于粒子群的聚类算法	187

6.3.4 应用实例	187
6.3.5 基于粒子群聚类算法的图像分割	189
6.4 粒子群算法在 Web 社区识别中的应用	193
6.4.1 传统的 Web 网络社区结构发现算法	193
6.4.2 基于粒子群算法的网络社区划分模型	194
6.4.3 孤立点修复策略	196
6.4.4 测试及结果分析	197
参考文献	202
附录	205
A 粒子群算法相关国际学术组织及其会议	205
B 源程序清单	206
B.1 基于 PSO 的多层前馈神经网络分类器程序	206
B.2 基于粒子群算法的分类器程序	220
B.3 基于粒子群算法的混合遗传算法解 MST 程序	244

第 1 章

绪 论

在研究自然界的生物群体行为时,人们会惊奇地发现,群体系统所拥有的鲁棒性和应对复杂问题的解决能力,往往是依靠一套在个体间和个体与环境间的交互规则来完成的。例如,单只蚂蚁的能力极其有限,但当这些简单的蚂蚁组成蚁群时,却能够完成筑巢、觅食、清扫蚁穴等复杂行为。一群看似盲目的蜂群,却能造出精美的蜂窝,鸟群在没有集中控制的情况下能够同步飞行等。

在这些生物群体中,个体可以很快地适应群体的变化来应对外界的变化和挑战,同时群体又表现出非凡的自组织行为。自 20 世纪 50 年代开始,这种现象既吸引了仿生学家们的注意,同时也给计算机科学家、数学家等相关领域的学者带来启示。人们从生物进化的机理出发,提出了许多用于解决复杂问题的新方法。这些方法一类是用于优化计算,如群智能中的粒子群算法和蚁群优化算法及进化计算中的遗传算法、进化规划、进化策略等;另一些方法被用于复杂系统的仿真,如数字社会、虚拟市场等。类似这些利用生命系统的行为、功能和特征来研究计算和仿真问题的方法,被称为仿生计算方法(Bionics Computation method)。

群智能(Swarm Intelligence,简称为 SI)计算方法作为新兴的仿生计算方法已成为越来越多研究者的关注焦点,主要包括两种被广泛应用的算法:蚁群算法(Ant Colony Optimization,简称为 ACO)^[1]和粒子群算法(Particle Swarm Optimization,简称为 PSO)^[2]。前者是对蚂蚁群体食物采集过程的模拟,已成功解决了许多离散的优化计算问题,由意大利学者 Dorigo.M 于 1991 年首次提出。粒子群算法是受鸟群、鱼群等生物群落的防御、猎食行为中的搜索策略启发而形成的,是由美国学者 Kennedy 和 Eberhart 在 1995 年提出的,已在函数优化、神经网络训练、模式分类、模糊系统控制以及其他工程领域得到了广泛的应用^[3]。

1.1 群智能概述

群智能是一种基于生物群体行为规律的计算技术。其中的群体指的是“一组相互之间可以进行直接通信或者间接通信(通过改变局部环境)的主体(agent),这些主体能够通过合作进行分布式问题的求解”。而群智能指的是“无智能的主体通过合作表现出智能行为的特性”,如蜜蜂采蜜、筑巢和蚂蚁觅食、筑巢等,都需要依靠群体的协作。这种自然系统解决问题的能力,要优于彼此分离的个体所组成的系统。群智能在没有集中控制并且不提供全局模型的前提下,为寻找复杂分布式问题的解决方案提供了一种新途径。

在群智能领域,除已发现的生物群体行为规律外,新的思想也不断在不同领域涌现出来,并且影响着这个新兴的领域。无论群智能技术如何演进,一些关键的准则,如自组织、分布式、并行性和个体对于局部信息的利用等,都是研究群智能方法的关键。

群智能计算技术的研究工作主要集中于群智能基础理论、自然界的群体行为分析、设计和控制以及基于群智能的人工集群系统优化等方面。主要有以下几个研究领域:

- (1)基于粒子群算法和蚁群算法的多目标优化、约束优化的求解算法。
- (2)基于群智能的分布式调度、数据聚类、图的分割、决策支持和资源分配算法。
- (3)针对自然界群体生物系统的建模与分析。
- (4)群智能理论在计算机、通讯网络、机器人技术、机械制造、商业和金融、供应链管理 and 传输系统等领域中的应用。

目前,群智能的应用领域已扩展到多目标优化、数据分类、数据聚类、模式识别、电信 Qos 管理、生物系统建模、流程规划、信号处理、机器人控制、决策支持以及仿真和系统辨识等领域。群智能理论和方法为解决这些应用问题提供了新的途径。与一些基于梯度优化算法不同,群智能是一种概率搜索算法,概率搜索算法通常要采用多个评价函数,但与梯度方法及传统优化算法相比,其优点还是显著的。群智能方法主要有以下特点:

- (1)群体中相互合作的个体是分布的,这样更能够适应目前网络环境下的工作状态。
- (2)没有中心的控制与数据,这样的系统更具有鲁棒性,不会由于某一个或者某几个个体的故障而影响整个问题的求解。
- (3)可以不通过个体之间直接通信,而是通过非直接通信进行合作,这样的系统具有更好的可扩充性。

(4)由于系统中个体的增加而提高的系统通信开销在这里是十分小的,系统中每个个体的能力十分简单,这样每个个体的执行时间比较短,并且实现也比较简单,具有简单性。

采用群智能理论解决工程优化问题的过程易于实现,算法中仅涉及一些基本参数操作,其数据处理过程对 CPU 和内存的要求也不高。群智能方法是一种能够有效解决大多数全局优化问题的新方法。更重要的是,群智能潜在的并行性和分布式特点,为处理大量分布式存储的数据提供了技术保证。无论是从理论研究还是从应用研究的角度分析,群智能研究都具有重要的学术意义和现实价值。

目前,群智能的研究还处于萌芽阶段,有很多问题需要进一步研究。首先,群智能中的优化算法都是概率算法,从数学上对于它们的正确性与可靠性的证明,还是比较困难的,所做的工作也比较少;其次,这些算法都是专用的算法,一种算法只能解决某一类问题,各种算法之间的相似性不高。此外,系统高层次的行为是需要通过低层次的个体之间的简单行为交互涌现产生的,单个个体控制的简单并不意味着整个系统设计的简单,我们必须能够将高层次的复杂行为(也就是系统所要执行的功能,如旅行商问题、数据聚类等)映射到低层次的简单个体的简单行为(例如,蚁群算法中信息素的遗留)上面,而这两者之间是存在较大差别的。在群体系统的设计时,要保证多个个体简单行为的交互,能够涌现出我们所希望看到的高层次的复杂行为,这可以说是群智能中一个极为困难的问题。虽然,群智能的进一步研究工作还会遇到许多困难,但可以预言,群智能领域代表了未来计算机科学、运筹学与计算科学等领域研究发展的重要方向之一。

1.2 群智能仿真

群智能主要包括群智能仿真和群智能计算两个研究领域。群智能仿真包括对生物群体行为的仿真和复杂系统模型的模拟。其中,生物群体行为仿真主要服务于影视、动画业,基于 Agent 的系统模型仿真主要对经济系统或社会行为进行仿真提供决策支持。

1.2.1 群体生物行为的复杂性

群体生物最引人注目的模式之一就是其群体行为的复杂性^[4]。传统的观念认为,群体的形成可以被视为一种朝有利方向发展的进化过程。个体成员可以得到保护、交配机会增加以及群体的信息能够有效利用等,当然这是以有限的资源为代价的。群体虽然是由单独的个体成员组成的,但它又表现为一个密不可分的整体,展现出一系列复杂的行为方式。这些行为方式通常是不会在个体的级别上得到体现的。复杂性理论指出,大量的个体可以自组织成群体,这些群体会产生自己的模

式,存储信息并进行集体水平的决策。这就引出一个问题,动物群体的功能是突现的特征,还是仅仅只是一些简单的模式?要想解决这个难题,必须把理论研究和与实验工作相关的建模研究紧密地结合到一起,处理在群体中受限个体的选择和行为模式。

动物群体存在于多种情况下:从细菌到鲸鱼,从10个到1千万个,从生命短暂的浮游生物群到受约束的暂时稳定的鱼群。眼睛所能看到的是集合体——一群、一团、一批,而不管它们中的成员是否协调工作。群体常常表现为一个整体,它所具有的属性并不是个体行为的简单叠加。在有些情况下,它将会产生新的功能,比如建一个巢或保持蜂巢恒温(蜜蜂、白蚁),形成一个孢子携带结构(粘液菌),或者聚众袭击(狼群)。在其他一些情况下,一些属性仅仅对于一个群体有意义。比如一个定义清晰的边缘(蝗虫中的跳蚤群),一个协调非常好的密度(一群鱼),没有领袖的极,或是一个清晰的形状,它们的拓扑结构会根据具体的任务而变化(分支的蚂蚁队伍)。一些群体还显示出流动性和一致性。如图1.1所示鱼群的风车状^[5],还有水泡状、喷泉状、闪电式的扩展。这些突现的群体属性,从最近的复杂性的研究来看并不令人吃惊,这些研究表明,大量简单的相同个体(比如,旋转的磁极)可以自组织、形成模式、存贮信息并可获得“集体决策”,即使是个体(行为)规则非常简单,非线性交互也会使一个大的群体产生复杂的行为。

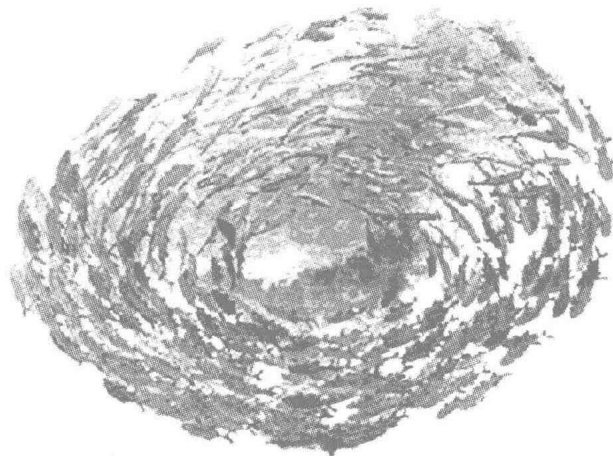


图 1.1 鱼群自组织行为

从操作性的观点来看,动物群体可分为两大类:一类是可以“自组织”的,比如鸟群、鱼群以及兽群,这也是复杂性理论最令人着迷的群体;另一类是在外部诱因,如光或食物出现时形成的,比如金枪鱼的鱼群会在漂浮物的下方产生^[6]。

动物聚集要基于进化论的假设,即个体加入一个群体必须可以增加一个新成员的生存或繁殖的机会。在具有保护性物理结构的兽群中,最强壮的成年个体会处在最外面,这样幼体的生存机会就会增加。传统的观点认为,形成群体有以下几

个原因:

(1)群体的警戒性以及迷惑效应(让捕食者不能在许多个体之中紧紧盯住一个目标),可以避开捕食者,减少被捕食的可能性。但是持续的群体也会吸引捕食者,海洋的哺乳动物就是利用它们的猎物爱集中的特点来进行成功的攻击。最优秀的集中捕食者是人类,他们可以每年打捞出4千万吨的海鱼以及无脊椎动物,因为这些品种通常聚集得非常紧密。

(2)选择因素可以使个体趋于聚合。比如交配以及交配机会可以导致小的、短暂的集合(成群的蚊子),也可以导致大的可预期的群体(一些种群往返于产卵地的动物)。另外,个体特定的相对位置可以在飞翔或游泳中得到能量上的益处,比如大雁群排成“人”字飞行,可以减少约10%的飞行阻力等。

(3)在逆境下的生存策略要求必须合作。例如,变形虫聚集会形成一种多细胞核的孢子携带结构,并把它们其中一部分散布到其他的地方,在群体中寻找食物的能力也得到了增强。群体会像一群传感器和反应器一样进行交互工作,会收集并且分析周围环境的各种信息,这是单独个体所不能完成的。这些传感器系统把物理信号转换成社会信号,放大或衰减为群体的反映。

(4)群体的形成还可能由个体的生存资源是否容易获得以及为使资源质量统一而产生的交互行为等因素产生。这会导致具有高质量资源的地区存在高密度的集合体。群体一旦形成,类似于捕食之类的生物学因素,就会作为一种选择因素来维持群体所产生的属性——包括群体大小、形状、结构和对个体的约束。

无论个体是否有生命以及是否有目的,个体间的非线性交互产生模式与结构是群体形成的主要原因。群智能理论集中于研究产生群体的条件,也就是研究个体的“决策”如何影响群体的形状、大小、功能和变化以及确定性和随机性的交互。研究群体的主要方法有三种:第一种是基于某种随机过程的散布近似,使用偏微分方程来描述一个群体的平均密度。这叠加于一些引起同种或外部资源吸引或排斥的因素之上^[7]。偏微分方程丰富的理论很可能会取得分析性的进展。尽管这些模型的真实性的局限性大的、密度较高的和没有明显不连续的群体,但一些模型也允许非本地交互,比如听觉与视觉^[8]。利用这种模型,可以得出群体自组织的重要性。首先,群体在低密度时,为了保持群体不解体,吸引应该超过排斥。但是在高密度时,为了防止不可预料的坍缩,排斥应该占优。换句话说,排斥较吸引而言,相对于密度呈现出更明显的非线性。其次,非本地交互对于长期的、流动的群体来说非常重要,但是也无法阻止由于时间较长而造成尾部成员流失。

第二种理论方法是基于个体行为特性的,它用运动方程描述个体的运动、复杂的受力以及速度^[9,10]。随机效应常常也会被考虑进去,来反映噪音或者个体的不完备响应。这样的模型可更准确地描述群体中的个体的实际行为,然而对它们的分析却是很困难的。所以,人们只研究它的数字模拟或近似解。

第三种方法是不使用运动方程,而是直接依赖于对个体行为规则和运动的离散变化。比如元胞自动机或是“格子气”仿真^[11,12]以及多智能体模拟系统 Swarm 平台,它已经被应用于蜂窝、鱼和其他群体的建模。还有观点认为,离散的方法可以详细地展现个体怎样影响群体的行为。然而,许多种规则都会适用于群体行为,所以,尽管结果是可视化的,但它也很可能是信息不完备的(从表现出的属性并不一定能推导出个体的行为)。真实生命体的个体行为可能是非常复杂的,很难用仿真来再现。简单的规则可以产生像生命群体一样的行为,但这并不意味着生命系统实际上遵守这些简单的规则。

突现的特性是动物群体的一个重要特征,它并非要有利于进化。一部分突现可以带来种群适应上的益处,而另一部分仅仅是简单的表象。群体的大小和形状是一个按资源、生理结构、个体行为以及个体感知能力的限制而变化的函数,极端的大与小都是不利的。作为一个单元,即使个体在不停地运动,群体也会保持稳定,新的成员可以传递经验。但主体的快速更迭会影响这一社会存贮功能。形状、内部结构以及群体的运动,都是由受限的群体决策控制而产生的突现特性。那些看起来导致群体连续性的合作,实际上可能是个体间的冲突,不过它们被最小化解体代价的必要性所掩盖了。

群体所产生的突现现象可以逐渐演化成群体的功能。何种模式和模式间如何相互协调以及产生何种功能,从小的个体来开始研究群体功能,这将是极具挑战性的研究领域。除非我们能在实验上取得进展,否则我们不可能真正地理解动物群体行为,更难解密暗含在这些复杂系统之中的规则。数学上,研究描述大范围效果的仿真模型以及从中确定随机的影响因素是很有意义的。然而,如何将建立的模型和真实世界的群体现象联系起来,也将是一个挑战。此外,其他一些因素也会影响群体形成的可能性,比如通过控制群体的社会环境参数来控制个体数量。复杂性理论会有利于我们理解群体行为吗?随机波动对于算法获得全局最优状态的重要性表明,在群体组织中噪音也起着重要的作用。是否其他的理论也会对群体研究有帮助尚有待于研究。

1.2.2 生物群体行为的仿真

人们经常能够看到成群的鸟、鱼或浮游生物,这些生物聚集在一起共同觅食和逃避捕食者。它们的群落规模以十、百、千甚至万计,并且经常不存在一个统一的指挥者。那么它们是如何完成聚集、移动这些功能呢?

其实,这些看似毫不相关的问题都具有相同的特征,即相对简单的个体在没有一个集中控制的情况下,通过相互作用产生复杂的群体行为。它们都属于复杂系统研究的范围,许多领域的专家已经对这些问题进行了长期、深入的研究,并建立了一些基本仿真模型。

例如,对于动物群体的聚集行为有两种数学的描述。第一种方法是在考虑到相同物种的相互吸引与排斥的同时,基于每个个体的随机移动,利用欧拉连续方程(偏微分方程)进行描述,从而描述整个群体的密度;另外一种方法是基于个体的轨迹,利用拉格朗日方程对于个体的移动、速度等进行描述。

然而随着计算能力的普及,生物群体行为的仿真可以不利用方程,而是通过对个体行为准则的模拟进行建模,这种建模方式被称为基于主体的仿真(Agent Based Simulation)。这种建模方式强调群体中的每个个体的特性,更强调个体之间的相互交互作用。后者是许多传统建模方式所缺少的,这种建模常常能够对模型进行可视化的观察。例如,著名的鸟群仿真模型——Boid模型,因为该模型是粒子群算法的启发模型之一,有着重要的参考价值。

Boid(Bird-boid)模型^[12]是1986年Craig Reynolds提出的,用以模拟鸟类聚集飞行的行为。在这个模型中,每个个体的行为只和它周围邻近个体的行为相关,并遵循避免碰撞(Collision Avoidance,避免和邻近的个体相碰撞)、速度一致(Velocity Matching,和邻近的个体的平均速度保持一致)和向中心聚集(Flock Centering,向邻近个体的平均位置移动)等三条原则。鸟群中的每只鸟在初始状态下,在随机位置上向各个随机方向飞行。随着时间的推移,这些初始处于随机状态的鸟通过自组织(self-organization)逐步聚集成一个个的群落,每个群落以相同速度朝着相同方向飞行。然后,几个小的群落又聚集成大的群落,大的群落可能又分散为几个小的群落。这些行为和现实中的鸟类飞行的特性是基本一致的。图1.2展示了群体在运动过程中的合并与分离的现象。

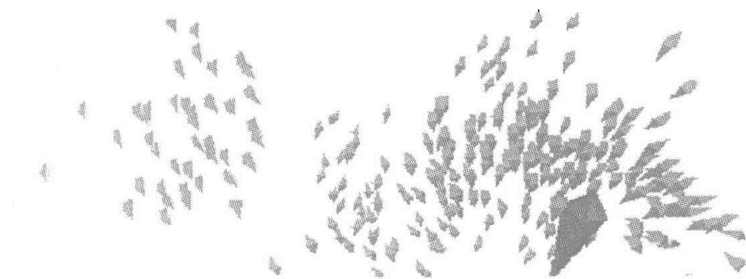


图1.2 Reynolds的Boids仿真

鸟群的同步飞行只是建立在每只鸟对周围的局部感知上,并不存在一个集中的控制者。也就是说,整个群体组织起来,却没有一个组织者,群体之间相互协调也没有一个协调者。

1.2.3 基于Agent的系统模型仿真

基于主体(agent)的仿真在生物学、文化与人类学、政治学、经济学以及地理学等方面都得到了广泛的应用,可以用它来研究城市的形成、政党的产生、股市波动