

从群集到社会行为控制^{*}

程代展¹ 陈翰馥²

(中国科学院系统科学研究所, 博士生导师、研究员¹; 研究员、中国科学院院士、中国自动化学会理事长² 北京 100080)

〔摘要〕 群集行为是目前复杂性科学研究的一个核心问题, 生物学家及物理学家对此作了大量研究; 计算机科学家通过人工生命等方法揭示了其从主体的简单运动规则到整体的优化性质, 即涌现现象。如何对这种群集行为数学建模, 并将其应用于人造世界, 如一组机器人、车流、机群等的协作、编队等社会行为控制, 是目前复杂性科学的前沿课题。本文旨在对从群集行为建模到其对社会行为控制的应用的目前动向作一综述介绍。

〔关键词〕 主体 涌现 社会行为 控制

〔中图分类号〕 O231.2 O4

〔文献标识码〕 A

〔文章编号〕 1000-7857(2004)08-0004-04

FROM SWARM TO SOCIAL BEHAVIOR CONTROL

CHENG Dai-zhan CHEN Han-Fu

(Institute of Systems Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: Swarm behavior is a key issue in the current investigation of complexity. It have been studied by many biologists and physicists. Using artificial life etc., it has been revealed by computer scientists that some simple moving rule of agents may cause certain optimal behaviors, which are called emergence. A challenging problem in complexity is the mathematical modeling of such swarm behaviors and its application to the control of social behavior in artificial world, such as group of robots, traffic flow, team of flights etc. The purpose of this paper is to provide a survey on the current development of the investigation on modeling of swarm behavior and its applications to the control of social behaviors.

Key Words: agent, emergence, social behavior, control.

CLC Number: O231.2 O4

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2004)08-0004-04

1 群集行为

群集行为(Swarm behavior)是目前复杂性科学研究的一个焦点。这方面的有关文献极多, 例如文献^{[15], [13], [14], [11]}。它之所以如此吸引人, 其主要原因之一是它的以下特征: 基于主体(Agent)的协作规律可能产生难以想象的整体同步效应, 这在复杂性科学中称之为涌现(Emergence)。

下面是几个典型的群集现象。(1)当大雁群从一地迁徙到另一地点时, 它们会排成整齐的人字型队伍, 而这种队形可自动调整以躲避敌人或超越障碍等。(2)鱼群及野生动物群在觅食或逃避天敌时, 它们的行动如同一个有机体。例如鹿群在逃避老虎时, 它们不是作鸟兽散, 而是形成一个合理的队形。某一只鹿可能根本就没有看到老虎, 它只是根据附近鹿的奔跑形式来决定自己的行动方式。(3)蜜蜂在筑巢时, 并无设计蓝图, 也没有“工程师”监督指导, 但蜂巢却具有结构强度最优的性质。(4)蚁群能在居住地与食物之间形成一条“高速公路”。当路上出现障碍时, 它们会设法绕过, 并在不同路径中选优; 当环境变化时, 它们会重新选优。蚁群间的信息交流和优化, 是群集行为的一个极具代表性的例子。

群集行为, 也称社会化昆虫(Social insects), 具有以下特征: (1) 灵活性 (Flexibility), 表现在它对环境的适应性

(Adaptability); (2) 鲁棒性 (Robustness), 表现在它不受内外干扰的影响; (3) 分散性 (Decentralized characteristics), 表现在它的动力学行为是以单个主体行为为基础的; (4) 自组织 (Self-organized), 表现在系统经自主的演化表现出显著的整体性质, 即涌现。

为研究群集行为并将其应用于工程问题, 许多计算机仿真技术及数值方法得到发展^{[2][6]}, 例如: (1) 神经网络; (2) 遗传算法; (3) 人工生命; (4) Swarm 平台。

神经网络和遗传算法等, 是利用生命现象的某些特征而发展起来的数值方法。Swarm 平台是美国复杂性科学研究中心 Santa Fe 研究所发展起来的用以模拟群集行为的一个软件平台。人们力图用人工生命技术, 即用计算机仿真生命的产生和演化。它们可以被看作是虚拟实验平台。

现在有一种观点: 当初由伽利略开始的实验物理学大大促进了科学的发展, 今天计算机科学的发展, 使人们可以在计算机仿真这个虚拟世界里进行现实世界无法进行的物理实验, 如生命的产生和演化、群集行为、核战争、股市振荡等。这种“实验”将对科学发展产生巨大影响。人工生命、Swarm 平台等正是这样一些实验, 它们揭示了群集行为的特征, 特别是简单主体规则与复杂整体行为之间的关系。但是, 计算机“实验”有它的局限性。首先, 它对主体个数的限制是很严格的。许多演化过程都是 NP 问题, 它不可能靠计算机技术的发展完全解决对个体的限制。其次, 仿真的方法难以进行理论分析与设计, 因此, 很难将其应用到其它复

^{*} 本文获 Sida-VR 瑞典研究交流基金(348-2002-6936)和国家自然科学基金(60274010、60343001、60221301、60334040)资助。

杂系统的干预与控制中去。因此,对群集及其动态行为进行数学建模与分析,对其理论研究及应用设计都是极其重要的。可以说,这是人类将其从社会化昆虫世界学来的知识应用于自然界及人造社会(机器人、交通、飞行器等)的唯一途径。这是一个极富挑战性的研究方向。

本文旨在对群集行为的数学建模、理论研究及其在人造系统的社会行为中的应用的近期发展作一综述介绍。

2 集结 (Aggregation)

集结是群集活动的一个重要现象,例如细菌的聚集、蜜蜂筑巢等均与此有关。本节介绍目前集结的动态建模与性质研究,内容基于文献^{[7][8][4]}。

设空间有 N 个粒子(主体),每个粒子的运动服从如下动力学规律:

$$\dot{x}^i = \sum_{j=1, j \neq i}^N g(x^i - x^j), \quad i=1, 2, \wedge, N \quad (2.1)$$

这里函数 g 为:

$$g(y) = -y[g_a(\|y\|) - g_r(\|y\|)] \quad (2.2)$$

直观地说,对每个粒子有两个作用,一个为吸引项 $g_a: R^+ \rightarrow R^+$, 另一个为排斥项 $g_r: R^+ \rightarrow R^+$ 。它们由相应的势函数生成,即存在函数 $J_a, (J_r): R^+ \rightarrow R^+$, 使得 $\nabla_y J_a(\|y\|) = y g_a(\|y\|)$, $\nabla_y J_r(\|y\|) = y g_r(\|y\|)$ 。

文献^[7]中给出的一个典型形式为:

$$g(y) = -y[a - b \exp(-\frac{\|y\|^2}{c})] \quad (2.3)$$

当 $n=1$ 时,该函数的形态见图 1。

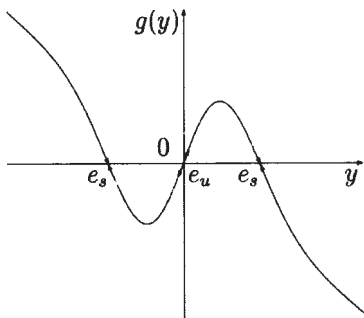


图 1

这里 e_s 是稳定平衡点, e_u 是不稳定平衡点。直观地看,质点将收敛到与中心定距离处。

在这个数学模型下可以证明以下几个结论: {1} 粒子的平均中心 ($\bar{x}$) 是静止的; {2} 所有粒子将集结到集合 $\Omega_\varepsilon = \{x | x - \bar{x} \leq \varepsilon\}$ 内; {3} 当 $g(y)$ 取公式(2.3)中的特殊形式时,还可以证明当 $\|x^i(t) - \bar{x}\| > \delta$ 时, $x^i \rightarrow \bar{x}$, ($\delta = \sqrt{c \ln(b/a)}$); 所有粒子将集结到 $B_\varepsilon(\bar{x}) = \{x | \|x - \bar{x}\| \leq \varepsilon\}$ 内 ($\varepsilon = \frac{b}{a} \sqrt{\frac{c}{2}} \exp(-0.5)$)。这些理论分析确实反映了群体集结的一些特征。

3 利用邻域规则的协作

群集中的每个个体只利用其邻域的信息指导其行为,但整个群集却出现良好的整体性质,这是群集行为的一个重要特征。因此,研究利用邻域信息的个体规则与整体效应的数学模型及其实现,成为复杂性数学理论的一个研究重

点。这里介绍的部分内容基于文献^{[9]、[10]}。

考虑 N 个粒子 $x_i(t)$, $i=1, 2, \wedge, N$ 。假设它们以常速度在一个平面上运动,用角度 $\theta_i(t)$ 表示第 i 个主体在时刻 t 的运动方向,用 r 表示圆形邻域的半径,即第 i 个粒子的邻域为 $N_i(t) = \{s | \|s - x_i(t)\| \leq r\}$, 则(离散时间)动力学模型可用下式描述:

$$\theta_i(t+1) = \langle \theta_i(t) \rangle_t \quad (3.1)$$

其中

$$\langle \theta_i(t) \rangle = \frac{1}{1+n_i(t)} \left(\theta_i(t) + \sum_{j \in N_i(t)} \theta_j(t) \right)$$

首先将该模型转化为切换模型。我们用以下例子说明转化过程。

例如,取 $N=4$ 并考虑平面上的 4 个点 $x_1(2,2)$, $x_2(5,5)$, $x_3(8,8)$, $x_4(5,9) \in R^2$, 假使邻域半径 $r=3\sqrt{2}$; 如果 $x_i \in N_j(t)$, 则在 t 时刻 4 个点的平面图中将 x_i 与 N_j 连接起来,这样得到的图称为邻接图(图 2)。

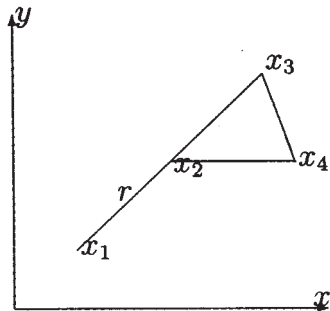


图 2 邻接图

从以上邻接图,我们定义邻接关系矩阵如下:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

其中第 i 行表示第 i 个粒子的相邻关系,即,

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & x_j \in N_i; \\ 0, & x_j \notin N_i \end{cases} \quad i=1, 2, \wedge, N.$$

定义权重矩阵为

$$D = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 \end{pmatrix}$$

这里 d_{ij} 表示 N_i 内($j \neq i$)的粒子个数。

单个图用 G_p 表示,所有图的集合记为 $\{G_p | p \in P\}$, 其中 P 是有限集。定义矩阵 $F_p = (I + D(p))^{-1}(I + A(p))$ 。则(3.1)可用如下切换系统描述:

$$\theta(t+1) = F_{\sigma(t)} \theta(t) \quad (3.2)$$

其中

$$\sigma(t): \{0, 1, 2, \wedge, \} \rightarrow P$$

这种方法得到的主要结果是:若 $\sigma(t) \in Q \subset P$, 其中 Q 是连通的(或每一段有限长的图 $G_{i_1}, \wedge, G_{i_n}$ 合在一起连通), 则

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \begin{pmatrix} \theta_1(t) \\ M \\ \theta_N(t) \end{pmatrix} = \theta^* \begin{pmatrix} 1 \\ M \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

注意:上式中 θ^* 是一个固定的方向! 因此,这个结果证明了以下这个同步现象:在一个很弱的条件下,如果每个粒子均以其邻域内的其它粒子的方向的平均来调整自己的方向,则最后所有粒子的速度会同向。这种同步现象是群集行为的一个重要特征。

4 群集中心

对一个群体,寻找群集中心是重要的,它在机器人通信、排雷、“放牧”等社会行为中有重要意义。本节给出了静态中心的一个结果。

问题可叙述为^[3],在 R^N 中有 N 个粒子 $x_i \in R^n, i=1,2,\dots,N$ 寻找最小的球:

$$B_i(C) = \{y \mid \|y - c\| \leq r\}$$

使得 $x_i \in B_i(c), \forall i$ 。

一个理论结果是:从 $k=2$ 开始,对任意 k 点作外接球,然后以这个球作为 k 维“大圆”,作 R^N 上的一个球(即它与 k 维球同圆心同半径),这样得到的第一个包含所有点的 N 维球就是最小球。

在数值计算上,设 $q_1, q_2, \dots, q_{k+1}$ 是 R^n 中 $k+1$ 个点, $q_i = (x_1^i, x_2^i, \dots, x_n^i)^T$, 它们位于某个球 $B^k(c, r)$ 的边界 $\partial B^k(c, r)$ 上,当且仅当 A 可逆。这里

$$A = \begin{pmatrix} Q \\ H \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1^1 - x_1^2 & x_2^1 - x_2^2 & \dots & x_n^1 - x_n^2 \\ x_1^2 - x_1^3 & x_2^2 - x_2^3 & \dots & x_n^2 - x_n^3 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_1^{k+1} - x_1^k & x_2^{k+1} - x_2^k & \dots & x_n^{k+1} - x_n^k \\ h_1^1 & h_2^1 & \dots & h_n^1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ h_1^{n-k} & h_2^{n-k} & \dots & h_n^{n-k} \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

并且,当 A 可逆时,中心 c 是:

$$c = A^{-1}B,$$

其中

$$B = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \sum_{s=1}^n (x_s^2)^2 - (x_s^1)^2 \\ M \\ \sum_{s=1}^n (x_s^{k+1})^2 - (x_s^k)^2 \\ \dots \\ \sum_{s=1}^n h_s^1 (x_s^2 + x_s^1) \\ M \\ \sum_{s=1}^n h_s^{n-k} (x_s^2 + x_s^1) \end{pmatrix} \quad (4.2)$$

这时 $\{h_s(x)\}$ 是球所在仿射子空间的正交子空间的一组基。

5 基于主体的社会行为控制

根据文献^[1],机器人领域特别感兴趣的4种典型的社会行为是:(1)群体(Flocking),特别是编队(Formation);(2)觅食(Foraging);(3)消耗(Consuming);(4)放牧(Grazing)。

●队形控制(群体):使一群运动自主的主体(mobile

autonomous agents)保持一定的几何队形(例如飞机编队、机器人协同运作等)。

●觅食:群集被随机地分布在环境,而群体的任务是将“食物”搬到某个中心位置(一种特殊情况是确定地点间的运输)。

●消耗:将“食物”放到适当的位置(如装配、拆卸、清除等)。

●放牧:要求团队有效地覆盖周围环境(如割草、搜索与营救、清洁等)。

这些社会行为具有如下几个特征:(1)行为规则基于单个主体;(2)行为过程是学习的和自适应的;(3)仅利用局部信息^[12]。

下面给出一个队形控制的例子^[5]:要求一组机器人满足给定的队形。

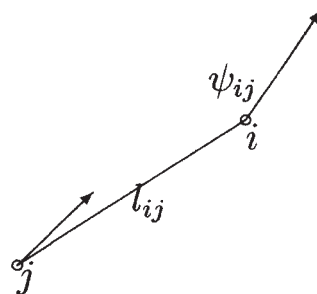


图3 跟踪

机器人的动力学方程为:

$$\begin{cases} \dot{Z}_{ij} = G_{ij}(Z_{ij}, \beta_{ij})u_j + F_{ij}(z_{ij})u_i \\ \dot{\beta}_{ij} = \omega_i - \omega_j \end{cases} \quad (5.1)$$

其中

$$G_{ij} = \begin{pmatrix} \cos(\gamma_{ij}) & d\sin(\gamma_{ij}) \\ -\sin(\gamma_{ij}) & d\cos(\gamma_{ij}) \end{pmatrix}, F_{ij} = \begin{pmatrix} -\cos(\psi_{ij}) & 0 \\ \sin(\psi_{ij}) & -1 \end{pmatrix}$$

$$Z_{ij} = [l_{ij}, \beta_{ij}]^T, \beta_{ij} = \theta_i - \theta_j, u_i = [v_i, w_i]^T, \gamma_{ij} = \beta_{ij} + \psi_{ij}, Z_{ij}^d = [l_{ij}^d, \beta_{ij}^d]^T$$

这里, l_{ij}^d 是第 i 个和第 j 个机器人的设计距离, β_{ij}^d 为它们的连线位置与运动方向夹角的设计值(图3)。

$$\text{利用控制 } u_{ij} = G_{ij}^{-1}(p_{ij} - F_{ij}u_i), \text{ 其中 } p_{ij} = \begin{pmatrix} k_1(l_{ij}^d - l_{ij}) \\ k_2(\psi_{ij}^d - \psi_{ij}) \end{pmatrix},$$

$k_1 > 0, k_2 > 0$, 我们得到如下跟踪结果:

$$z_{ij}(t) \rightarrow z_{ij}^d, t \rightarrow \infty$$

这个例子是典型的基于个体(Agent-based)的动力学模型和基于局部信息的控制,因为方程是对个体建立的,而控制只利用局部状态反馈。

6 总结

下面对本文介绍的工作做一小结。

对于群集行为,目前位置的聚合与速度的同步分别被单独研究,而且,位置聚合的例子中实际上用了全局信息。而更合理的模型是同时考虑位置与速度(例如,考虑雁群)。我们提出如下模型:

经济复杂性及一些相关的问题

方福康

(北京师范大学非平衡系统研究所, 教授、博士生导师 北京 100875)

〔摘要〕 在经济复杂系统的后面,存在着基本的运行机制,通过整合基本的运行模式,能给出经济复杂现象的实际解释。文章提出了 J 过程,是一种典型的非均衡增长模式,实际的增长可以通过其与索洛增长、突变式增长等模式的整合予以实现。借鉴经济复杂性研究的思路 and 所获得的对复杂系统基本规律的了解,文章初步讨论了几个密切联系着的领域:生态经济、知识管理和学习过程的自组织机制,简要介绍了这些领域的现状和复杂性研究方法的应用。

〔关键词〕 复杂性 经济增长 生态经济 知识管理 自组织 [中图分类号] F2 O4

〔文献标识码〕 A

〔文章编号〕 1000-7857(2004)08-0007-05

ECONOMIC COMPLEXITY AND ITS RELEVANT PROBLEMS

FANG Fu-kang

(Institute of Non-equilibrium Systems, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: In the economic complex system, there exists basic rules and mechanism. The complex economic phenomena could be actually explained with integration of some basic evolutionary modes. J process, a typical mode of non-equilibrium growth, is studied by us. By integrating J process, Solow's growth model, Jump growth model and et al, the real growth could be explained. Referring to the approach to economic complexity and our investigation on the basic rules in complex system, several relevant fields are discussed, including ecological economics, knowledge management and the self-organization mechanism of learning process. In this paper, the newest research in these fields and the application of complexity approaches are briefly introduced.

$$\begin{cases} x(t+1)=x(t)+v(t) \\ v(t+1)=\sum_{i=1}^N A_p^i(t)G^i(t)+(I+D_p^{-1}(t))(A_p(t)+I)v(t) \end{cases} \quad (6.1)$$

这里,位置的聚集和速度的同步都依赖于局部邻接图。

基于单个主体的控制是一种解决复杂系统控制的合理途径,它提出了一种新的系统描述与控制设计,目前,它在交通、电网、飞行器编队及机器人合作中得到重视和初步的应用,并受到研究者的关注。

复杂系统特别是对群集行为的研究,经历了 3 个阶段:首先是生物学家做了大量研究,发现了许多群集特有的动态行为;第二阶段是实验物理学家和计算机专家做了许多实验和仿真,证明这种现象可由个体的简单行为规律获得;目前,利用数学严格建模及分析的第三阶段已经开始。复杂系统及复杂性行为的建模是复杂系统研究走向理性及量化的关键步骤,数学描述与分析是将我们从社会化昆虫学到的知识运用到复杂系统控制与设计的一座桥梁。

参考文献 (Reference)

- [1] R C Arkin. Behavior-based Robotics [M]. Massachusetts, USA: MIT Press, 1998
- [2] E Boabeau, M Dorigo, G Theraulaz. Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems[M]. Oxford, UK: Oxford Univ. Press, 1999
- [3] D Cheng, X Hu, C Martin. On the smallest enclosing balls. preprint, submitted, 2004
- [4] Tianguang Chu, Long Wang, Tongwen Chen. Self-organized motion in anisotropic swarms [J]. Journal of Control Theory and Applications, 2003,1:77~81
- [5] A K Das, R Fierro, V Kumar, J P Ostrowski, J Spletzer, C J

- Taylor. A vision-based formation control framework [J]. IEEE Trans. Robot. Aut. 2002,18(5):813~825
- [6] G Flierl, D Grunbaum, S Levin, D Olson. From individuals to aggregations; the interplay between behavior and physics [J]. J. Theoret. Biol., 1999,196: 397~454
- [7] V Gazi, K M Passino. Stability analysis of swarms [J]. IEEE Trans. Aut. Contr., 2003,48(4):692~697
- [8] V Gazi, K M Passino. A class of attraction/repulsion functions for stable swarm aggregations. Preprint, 2004
- [9] A Jadbabaie, J Lin, A S Morse. Coordination of groups of mobile autonomous agents using nearest neighbor rules [J]. IEEE Trans. Aut. Contr., 2003, 48(6): 988~1 001
- [10] Y Liu, K M Passino, M M Polycarpou. Stability analysis of \$M\$-dimensional asynchronous swarms with a fixed communication topology[J]. IEEE Trans. Aut. Contr., 2003,48(1):76~95
- [11] T D Michener. The Social Behavior of the Bees [M]. Cambridge, MA: Harvard Univ. Press, 1974
- [12] P Ogren, M Egerstedt, X Hu. A control Lyapunov function approach to multiagent coordination [J]. IEEE Trans. Robot. Aut., 2002,18(5):847~851
- [13] K Passino. Biomimicry of bacterial foraging for distributed optimization and control [J]. IEEE Control Syst. Mag., 2002,22: 52~67
- [14] C Reynolds. Flocks, herds and schools, a distributed behavioral model[J]. Comp. Graph., 1987,21(4):25~34
- [15] T D Seeley, R A Morse, P K Visscher. The natural history of the flight of honey bee swarms[J]. Psyche., 1979,86:103~113

(责任编辑 苏 青)