

系统理论揭示鸟群形成之谜

吕金虎

中国科学院数学与系统科学研究院

天空中整齐划一飞行的鸟群，它们的集体运动仿佛是经过精心编排过的舞蹈。图 1 展示了迁徙中的八哥鸟美丽的群体行为。列队群体运动中的鸟似乎都确切知道在何时、何处改变方向才能使鸟群凝聚力的耗散达到充分小，使整个群体的运动流畅且不至于分裂，使一些鸟因脱离群体而受到天敌威胁。为更好认识各种生物、人群及其他移动体的群体行为，研究者们长期以来用各种理论和实验的方法系统地揭示了群体行为中个体运动的规律、复杂性、多样性及其中的奥秘。



图 1. 阿尔及利亚，迁徙的八哥鸟
(法新社摄影师 Fayez Nureldine)

什么是个体呢？Wooldridge 与 Jennings 在 1995 年给出了如下定义：考虑计算机系统

的某个环境，个体是该系统中有能力通过自主运动实现特定目标的元素。一般来说，每个个体在追求自己的目标时产生输出，该输出通常能影响环境，但不能完全控制环境。多个体系统是某个特定环境中的大量个体通过相互作用组成的一个整体。多个体系统是复杂系统研究的一个重要切入点，它可以用于解决单个个体或单个系统难以解决的问题。多个体系统通常具有一定的智能。过去二十年，多个体系统理论及其应用得到了迅猛发展。我们以鸟群为例，简要介绍多个体系统的相关进展。

一、经典的鸟群模型

1987 年，Reynolds 在计算机图形学会议 ACM SIGGRAPH Computer Graphics 上提出了第一个模拟鸟群的计算模型——Boid 模型。Boid 这个单词的本意是笨鸟，该模型假设每只鸟的行为服从如下三个基本原则^[1]：

1. 排斥：避免与相邻的个体发生碰撞；
2. 速度匹配：尽量与相邻的个体保持速度上的同步；
3. 聚集：尽量与相邻的个体靠近，避免孤立。

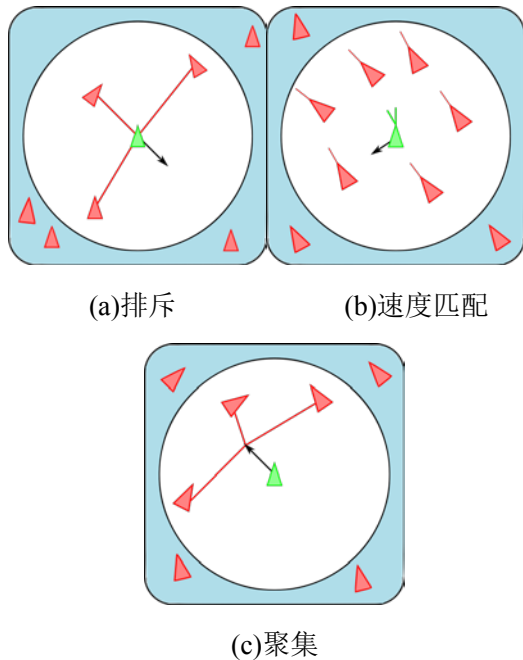


图 2. 个体(Boid)行为遵循的基本原则: (1)排斥: 最小间隔距离; (2)速度匹配: 保持最小间隔距离; (3)聚集: 个体趋向于群体中心。

在这篇开创性论文中, 个体的初始速度和方向是随机的, 个体的运动方向取决于个体的位置及邻居的方向, 且群体运动可以在没有领导者的情况下发生。Boid 模型来源于对自然生物群体运动的观察, 可以用以解释群体运动中的聚集、同步以及旋转运动等现象。Boid 模型还可用于解释上述现象之间的本质联系, 在鸟群行为研究中具有基本的重要性。

2001 年, Reynolds 创建了多个体系统群体运动的网站:

<http://www.red3d.com/cwr/boids/>

该网站提供各种群体运动研究所需的资料,

包括源代码、演示(Demo)、可视化(视频)及相关文献。

Boid 模型为鸟群群体行为的研究提供了一个很好的计算机模拟框架, 但是由于该模型太复杂而不便于定量分析。1995 年, Vicsek 等人提出了一个简单的鸟群集群行为运动模型——Vicsek 模型^[2]。尽管 Vicsek 模型最初的目的是用于刻画自驱式粒子系统的群体行为, 但也可以用于描述鸟群的群体行为。由于 Vicsek 模型比较简单, 所以在过去二十年引起了广泛的理论研究。

Vicsek 模型的基本假设如下:

- 1) 个体邻居是以该个体为中心, 半径为 r 的圆形区域内所有的个体;
- 2) 更新规则: 个体速度大小不变, 速度方向为自身及其所有邻居速度方向的平均, 其中 $\Delta\theta$ 为随机噪声, 第 i 只鸟在 $t+1$ 时刻的速度方向 $\theta_i(t+1)$ 的更新规则为:

$$\theta_i(t+1) = \arctan \left\{ \frac{\sum_{j \in N_i(t)} \sin \theta_j(t)}{\sum_{j \in N_i(t)} \cos \theta_j(t)} \right\} + \Delta\theta$$

这里 $N_i(t)$ 是第 i 只鸟在 t 时刻所有邻居的集合。

第 i 只鸟在 $t+1$ 时刻的位置 $x_i(t+1)$ 的更新规则为:

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t)\Delta t。$$

Vicsek 模型由于形式简单, 不但可以用平均场理论来进行一系列统计量的研究, 而

且还可以用系统理论及非线性动力学的方法来进行一系列深入的动态行为研究。2003年, Jadbabaie 等人给出了鸟群速度同步的一个基本判据^[3]。具体而言, 如果把鸟群的运动时间分割成一个有界无穷时间区间序列, 使得每个时间区间内鸟的邻居关系图是联合连通的, 则鸟群运动速度最终能达到同步。2007年, Tang 和 Guo 克服上述联合连通性这一本质困难, 给出了随机框架下鸟群速度同步的基本判据^[4]。具体而言, 假设 n 只鸟的鸟群的初始位置和初始速度服从在给定范围内服从独立均匀分布, 则对任意给定的初始速度和邻居半径, 当 n 充分大时, 鸟群速度同步概率大于 $1 - O(n^{-n/\log^6 n})$ 。

二、鸟群通信的层次性

在原始的 Boid 模型和 Vicsek 模型中, 所有个体在鸟群中的地位都是相等的, 并且每个个体只能从邻居个体中获取信息。然而, 我们生活中真实的动物群体行为并非如此。众所周知, 蚁群中有工蚁、兵蚁和蚁后等不同的角色。例如, 蚁群迁徙中不同的蚂蚁扮演着不同的角色。鸟群的群体行为亦是如此。因此, 我们有必要研究不同个体在群体行为中扮演的不同角色, 发挥的不同作用。

考虑飞行中鸟群的角色分工, 最简单的如领导者-追随者模型。2005年, Couzin 等人首次提出了群体运动中领导者涌现的规则。假定系统中只有少数个体知道运动方向, 其他个体并不知道谁是领导者, 整个群体能够在不改变系统原有局部规则的前提下实现

预期的群体行为^[5]。

众所周知, 研究鸟群群体行为的有效方式之一是获得个体运动的高精度时空位置信息, 但由于技术难度很大, 早期缺乏相关的远程监测数据。因此, 鸟群运动中通信机制的奥秘始终无法揭开。近年来, 由于导航与通信技术的发展, 很多学者借助高精度 GPS 追踪器对鸟群的通信行为进行了系统深入的研究。

1995年, Biro 等人利用高精度 GPS 追踪器深入研究了两只家鸽的飞行状况^[6]。他们发现: 当两只鸟的偏好飞行方向不同且差别较小时, 两只鸟的实际飞行方向会折衷并达到一致; 然而, 当它们的偏好飞行方向差别超过一定的阈值, 则两只鸟分别成为领导者和追随者。

2008年, Dell'Arciccia 等人通过在训练有素的家鸽身上配备高精度的 GPS 数据记录器来获取家鸽运动的时空信息, 从而深入研究飞行中鸟群的通信效率。他们发现: 家鸽群体飞行比家鸽单独飞行具有显著的生存优势^[7]。

鸟群的分工不是简单地把一群鸟分成领导者和追随者两类, 领导者和追随者之间的关系可能更加复杂。2010年, Nagy 等人通过高精度、便携式 GPS 追踪器获取家鸽运动的时空信息^[8], 并深入探讨了家鸽运动的规律。具体而言, 他们利用个体方向选择的时间先后顺序, 深入分析了不同个体之间的相互作用数据, 并发现了以下规律: i) 群体中个体之间存在着明确的层次结构(图3); ii) 鸽群中个体的位置与它的层次地位存在着强相关性; iii) 家鸽对信号的反应主要通过左眼

的感知能力。上述结果揭示了群体运动中不同位置的鸟在整个群体中扮演着不同的角色。

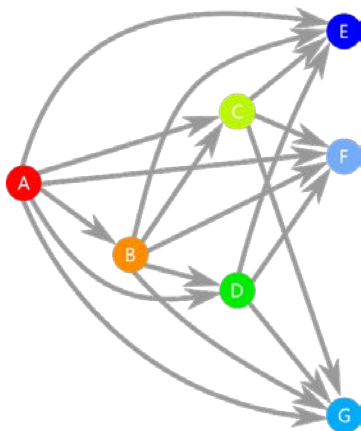


图 3. 鸟群分层通信示意图: 4 层, 其中第一层 A 是领导者, 其他层为追随者。

三、鸟群的信息传递和行为惯性

生物系统的群体决策通过所有个体的行为状态变化来实现。为了防止凝聚力损失, 群体在决策过程中确保信息传递的快速性和鲁棒性是非常重要的。然而, 由于群体运动的复杂性, 自然群体鲁棒性的成因还不得而知。20 世纪三十年代, 鸟类科学家 Selous 提出了鸟与鸟之间通过心电感应来传递信息的假设。后来, 人们通过一系列数学模型的研究提出了更为科学合理的假设。

2014 年, 罗马物理学家 Cavagna 等人通过高速录像机记录了鸟群飞行转向时每只鸟的位置及其姿态信息。通过图像分析处理, 他们重构出了每只鸟的三维运动轨迹, 并分析了鸟群转向时的信息扩散规律。基于上述真实的数据, 他们深入探究了鸟群转向决策

的机制^[9]。瑞典著名学者 Sumpter 教授评论说:“这是首次深入研究飞鸟群和谐运动本质规律的研究之一。”

在上述文章中, 鸟群方向变化的信号由领导者开始, 并以线性规律传播。转向信息的传播速度非常惊人, 以 20-40 米/每秒的速度通过整个鸟群。这意味着, 对于一个拥有 400 只鸟的群体来说, 转向信息只需半秒就能穿过整个鸟群。数据显示: 在转向过程中, 所有鸟的运动轨迹几乎处于同一平面上, 因此最大限度地提高了鸟群同步速度。由于 Vicsek 模型等已知模型预测上述鸟群转向信号在传递过程中逐渐耗散, 所以上述研究结果与已知结果相对立。

为何鸟群转向信号传递速度能够如此快呢? Cavagna 等人通过理论推导, 发现了传统模型中缺少一个守恒条件且忽略了运动的行为惯性。因此, 传统模型不能很好的解释鸟群转向运动中的信息传递规律。为了突破上述局限, 基于自发对称性破缺和守恒定律, Attanasi 等构造了一个鸟群的行为惯性模型^[9-11]。上述模型准确地刻画了群体中信息线性和无阻尼的传播的规律。上述理论结果不仅与实验数据吻合, 而且揭示了鸟群快速转向的生物进化规律。Cavagna 等人认为上述新的模型与描述液态氦分子的运动方程非常类似。如同量子物理定律所描述的那样, 当液氦冷却接近绝对零度时, 就会变成一种没有黏度的液体。在这种超流体中, 每一个原子都处于相同的量子状态。因此, 这种凝聚状态与鸟群队列在数学方程的描述上十分相像。最近, Sumpter 认为上述理论同样可以



用于刻画其他类似的群体运动，如鱼群或移动细胞组合等。

四、结语

大自然向我们展示了神奇的鸟群运动规律：鸟群的列队飞行规律，飞行中鸟群的信息层次传递规律，鸟群快速转向的规律等。本文简要地回顾了系统控制领域中一些群体

运动的模型与规律。在这些研究中，多个体系统理论对揭示鸟群运动的奥秘起到了举足轻重的作用。但是，鸟群运动中仍然存在着很多奥秘，期待着系统科学家们来揭开。

致谢：作者感谢朱恒辉和王雄两位研究生帮忙收集相关资料。

参考文献

- [1] Reynolds C W. Flocks, herds, and schools: A distributed behavioral model. *Comput. Graph.*, 1987, 21(4): 25–34.
- [2] Vicsek T, Czirók A, Ben-Jacob E, Cohen I, Shochet O. Novel type of phase transition in a system of self-driven particles. *Phy. Rev. Lett.*, 1995, 75(6): 1226–1230.
- [3] Jadbabaie A, Lin J, Morse A S. Coordination of groups of mobile autonomous agents using nearest neighbor rules. *IEEE Trans. Auto. Contr.*, 2003, 48(6): 988–1001.
- [4] Tang G, Guo L. Convergence of a class of multi-agent systems in probabilistic framework. *J. Syst. Sci. Complexity*, 2007, 20(2): 173–197.
- [5] Couzin I D, Krause J, Franks N R, Levin S A. Effective leadership and decision-making in animal groups on the move. *Nature*, 2005, 433: 513–516.
- [6] Biro D, Sumpter D J, Meade J, Guilford T. From compromise to leadership in pigeons homing. *Curr. Biol.*, 2006, 16(21): 2123–2128.
- [7] Dell, Ariccia G, Dell, Omo G, Wolfer D P, Lipp H P. Flock flying improves pigeons, homing: GPS-track analysis of individual flyers versus small groups. *Anim. Behav.*, 2008, 76: 1165–1172.
- [8] Nagy M, Kos Z, Biro D, Vicsek T. Hierarchical group dynamics in pigeon flocks. *Nature*, 2010, 464: 890–893.
- [9] Attanasi A, Cavagna A, Castello L D, Giardina I, Grigera T S, Jelic A, Melillo S, Parisi L, Pohl O, Shen E, Viale M. Information transfer and behavioral inertia in starling flock. *Nature Phys.*, 2014, 10(9): 691–696.
- [10] Chen Y, Lü J, Lin Z. Consensus of discrete-time multi-agent systems with transmission nonlinearity. *Automatica*, 2013, 49: 1768–1775.
- [11] Chen Y, Lü J, Yu X, Lin Z. Consensus of discrete-time second order multi-agent systems based on infinite products of general stochastic matrices. *SIAM J. Contr. Optim.*, 2013, 51(4): 3274–3301.