基于传递熵和有效信息存储的隐鸮信息传递过程研究

陈琳¹, 段海滨^{1,2*}, 范彦铭³

1. 北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院, 仿生自主飞行系统研究组, 北京 100083;

2. 鹏城实验室, 深圳 518055;

3. 中国航空工业集团公司沈阳飞机设计研究所, 沈阳 110035

* E-mail: hbduan@buaa.edu.cn

收稿日期: 2019-09-02; 接受日期: 2019-11-14; 网络版发表日期: 2020-04-07

科技创新2030-“新一代人工智能”重大项目(编号: 2018AAA0102303, 2018AAA0102403)和国家自然科学基金项目(批准号: 91948204, 91648205, 61425008, U1913602, U19B2033)资助

摘要 作为以线性编队进行迁徙的鸟类, 隐鸮编队飞行时个体间领航-跟随关系频繁的互换可延长群体飞行时间. 为分析隐鸮群体内部隐含的协调合作机理, 本文基于信息理论检测 and 量化集体迁徙的隐鸮群体中个体层面的信息传递动态. 首先采用局部传递熵来量化隐鸮迁徙过程中在空间和时间上的局部动态信息传递过程, 分析隐鸮个体间信息传递的规则, 理解隐鸮个体如何通过信息传递影响群体决策, 实现一致的群体运动状态. 然后采用局部有效信息存储来表征隐鸮的群体记忆, 通过计算隐鸮过去状态序列与下一时刻状态之间的互信息, 得到群体行为一致性与群体记忆的关系. 最后根据隐鸮的动态信息传递以及群体记忆与群体行为一致性之间的关系, 得到隐鸮转向过程中群体行为的激发以及汇聚模式与熵值的变化间的关系.

关键词 局部传递熵, 隐鸮, 信息传递, 局部有效信息存储, 群体记忆

1 引言

从空中飞翔的鸟群、草原上迁徙的羊群到河流中洄游的鱼群, 自然界中的许多生物群体都存在着复杂的群集行为. 在这些生物群体中, 尽管个体的感知、交互以及行动能力有限, 但是通过个体间的交互协作以及去中心化的个体决策, 可以形成有序的动态自组织协调行为, 涌现出超越个体能力的群体智能, 从而有效地完成迁徙、觅食、应激、御敌等复杂的任务^[1].

深入研究生物集群行为, 理解群体智能的涌现机理, 对于实现集群系统的自主控制具有重要意义. 为揭示群体智能的产生机理及作用机制, 众多研究者在群集行为机制研究和群集行为建模等方面作出了巨大的努力, 提出了Vicsek模型^[2]、Reynolds模型^[3]和Couzin模型^[4]等群集行为模型. 这些研究揭示了群体系统中宏观模式和秩序出现的本质, 解释了群集行为的部分规律, 标志着群体智能的概念与机理研究已取得一定的进展. 但是目前的群集行为机制及建模研究过程

引用格式: 陈琳, 段海滨, 范彦铭. 基于传递熵和有效信息存储的隐鸮信息传递过程研究. 中国科学: 技术科学, 2020, 50: 380–388

Chen L, Duan H B, Fan Y M. Anatomy of information transfer for Ibis using transfer entropy and active information storage (in Chinese). Sci Sin Tech, 2020, 50: 380–388, doi: 10.1360/SST-2019-0312

中, 为了便于分析, 各个环节均做了简化, 如在进行运动决策过程中采用邻居平均方向模式, 忽略历史状态因素对个体的影响, 用简单的邻近网络代替难以测量的生物群体实际交互网络等^[5]. 而实际实验表明生物群体在运动过程中并非邻居个体的简单叠加, 许多群集生物都具有记忆能力, 个体的运动可能受到历史状态的影响. 因此, 目前对于这种完全由局部交互产生的有序自组织现象的作用机制尚未完全清楚.

信息与生物群集行为息息相关, 信息是形成群体智能的基本要素. 其中, 信息的存储(记忆)与传递(交互)在形成群集行为的过程中发挥着重要作用. 研究群体中信息的存储以及传递对进一步理解群集的空间聚集性、运动一致性、行为有序性以及群集内部信息交互机制和决策机制有着重要意义.

针对不同时间序列间信息传递的测量问题, 现有研究提出了相关系数和协相关系数、Granger因果关系和互信息^[6]等方法. 其中, 相关时间序列分析只能获取序列间的线性依赖关系, 无法描述其中存在的非线性关系, 且对噪声敏感; 通过Granger因果分析实验数据可以推断出个体交互机制, 但是Granger因果关系及其相关的方法的使用是基于系统之间的关系是线性的假设前提下. 从信息论的角度, 利用互信息可以检测非线性依赖关系, 但是, 互信息并不能表示系统之间信息传递的方向性, 当其用于时间序列数据时, 时间序列的动态性会被丢弃. 随后, 文献[6]提出了传递熵, 传递熵是一种条件互信息, 专门用于检测两个耦合序列间的信息流, 能够同时解决非线性和不对称系统的问题. 文献[7]在传递熵的基础上, 提出了局部信息传递的度量方法——局部传递熵(local transfer entropy, LTE), 与传递熵相比, LTE提供了信息传递在时空上的分布.

随着传递熵的提出, 传递熵被广泛应用于许多研究领域, 如热力学、生态物理学、神经科学、生态建模等. 文献[8]首次将传递熵引入到群集运动的研究中, 采用LTE和局部有效信息存储(local active information storage, LAIS)来量化和描述集群系统的信息级联. 文献[9]通过传递熵分析, 从视频数据中推断出蝙蝠之间的领航-跟随关系. 文献[10]基于传递熵的概念提出了研究集群系统中信息的存储和传递的框架, 并基于该框架进行了元胞自动机、Ising模型等复杂系统的集群行为研究. 文献[11~13]采用信息熵的方法分析出了鱼群中的领航-跟随关系, 同样地, 传递熵的方法也被用

于分析动物群体行为中存在的切换领航关系^[14~16]. 对于集群系统, 熵可作为状态的混乱性和无序性度量, 传递熵的提出为集群系统复杂群集行为的研究提供了新方法, 也为群体智能的度量提供了新视角.

本文从信息论的角度检测和量化隐鸮群体中个体层面的信息存储和传递动态, 利用LTE和LAIS研究隐鸮群体飞行过程中的信息动态, 通过测量隐鸮行为状态受其他隐鸮行为状态及自身历史行为状态影响的程度, 揭示隐鸮个体间线性依赖关系之外的信息传递过程, 识别和量化隐鸮群体决策过程中的信息处理过程.

2 传递熵和有效信息存储

为研究隐鸮群体群集运动过程中个体如何使用其自身历史行为或群体中其他个体行为的信息来进行决策, 通过借鉴信息论的各种概念和度量方法, 本文采用LTE和LAIS来量化隐鸮群体中个体对其他个体行为以及个体自身短期记忆的依赖关系.

2.1 局部传递熵

传递熵是一种基于概率分布、香农熵、统计学的方法得出时间序列间因果性的方法, 传递熵以有向且动态的方式量化了集群系统的统计一致性. LTE描述了信息在给定系统中传输到每个时空点的情况, 用于估计信息源个体的当前及历史状态是如何影响信息宿个体的未来状态.

本文采用LTE来研究群体系统中的信息是如何传播的, 假设两个个体 X 和 Y , 将在 n 时刻由信息源个体 Y 指向信息宿个体 X 的局部传递熵定义为^[7]

$$\text{LTE}_{y \rightarrow x}(n, \tau) = \log_2 \frac{p(x_n | \mathbf{x}_{n-\tau}^k, \mathbf{y}_{n-\tau}^l)}{p(x_n | \mathbf{x}_{n-1}^k)}, \quad (1)$$

其中, x_n 为 n 时刻个体 X 的状态, τ 为从信息源个体 Y 向信息宿个体 X 传递信息的时延, $\mathbf{x}_{n-1}^k = [x_{n-1}, x_{n-2}, \dots, x_{n-k}]$ 为个体 X 的历史状态集合, $\mathbf{y}_{n-\tau}^l = [y_{n-\tau}, y_{n-\tau-1}, \dots, y_{n-\tau-l+1}]$ 为个体 Y 的历史状态集合, 其分别包括个体 X 前 k 个时刻的历史状态以及个体 Y 前 l 个时刻的历史状态, k 和 l 分别称为状态集合 $\mathbf{x}_{n-1}^k$ 和 $\mathbf{y}_{n-\tau}^l$ 的延迟长度, $p(x_n | \mathbf{x}_{n-1}^k, \mathbf{y}_{n-\tau}^l)$ 为条件概率, 表示在给定个体 Y 的历史状态集合 $\mathbf{y}_{n-\tau}^l$ 和个体 X 的历史状态集合 $\mathbf{x}_{n-1}^k$ 时向个

体 X 未来时刻的状态 x_n 传递的信息量, $p(x_n | \mathbf{x}_{n-1}^k)$ 表示个体 X 自身历史状态集合 $\mathbf{x}_{n-1}^k$ 向 n 时刻的状态 x_n 传递的信息量. 局部传递熵表达了信息源个体 Y 对信息宿个体 X 信息熵的影响, 可以用来衡量两个个体间的有向影响, 即个体 X 对个体 Y 的依赖程度, 但LTE是非对称的, 即 $\text{LTE}_{y \rightarrow x}(n, \tau) \neq \text{LTE}_{x \rightarrow y}(n, \tau)$.

当信息源与信息宿均为同一个体时, 式(1)可变化为

$$\text{LTE}_{x \rightarrow x}(n, \tau) = \log_2 \frac{p(x_n | \mathbf{x}_{n-1}^k \mathbf{x}_{n-\tau}^l)}{p(x_n | \mathbf{x}_{n-1}^k)}. \quad (2)$$

将如式(1)所示的同一个体的信息传递过程定义为自信息传递, 信息源为信息宿的瞬时历史状态.

2.2 局部有效信息存储

生物实证实验表明许多群集生物都具有记忆能力, 群集行为的一致性与群体记忆相关, 群体记忆促进了行为的局部一致性^[5]. 为了研究短期记忆对群体行为决策的影响, 本文采用LAIS来量化个体未来时刻状态对群体系统的记忆的依赖程度.

LAIS表示用于预测下一时刻状态的历史信息量, 是过去状态序列与下一个时刻状态序列之间的互信息. 对于具有长度为 k 的半无限序列, 将个体 X 的在 n 时刻的LAIS定义为^[17]

$$\text{LAIS}_x(n, k) = \log_2 \frac{p(x_n, \mathbf{x}_{n-1}^k)}{p(\mathbf{x}_{n-1}^k)p(x_n)}, \quad (3)$$

其中, $p(x_n, \mathbf{x}_{n-1}^k)$ 为 x_n 和 $\mathbf{x}_{n-1}^k$ 的联合概率.

3 隐鸢迁徙中的信息处理过程

3.1 隐鸢迁徙

本文所用的隐鸢迁徙数据来源于文献^[18], 其包含了14只隐鸢迁徙过程中在13091个采样点处的GPS坐标, 采样时间为0.2 s, 将GPS坐标中的北坐标、东坐标以及海拔高度定义为隐鸢 i , $i = 1, 2, \dots, 14$ 的空间位置坐标 $[p_{xi}(t), p_{yi}(t), p_{hi}(t)]$. 由于GPS测量的高度信号误差大, 仅考虑隐鸢在平面 $X_g O_g Y_g$ 上的运动. 根据隐鸢的位置坐标可得到如图1所示的隐鸢迁徙轨迹图, 为了描述14只隐鸢在迁徙过程中的个体行为, 用 $P_i(t) = [p_{xi}(t), p_{yi}(t)]$ 表示隐鸢 i 在迁徙过程中 t 时刻的位置, 从而可得隐鸢的飞行速度为

$$\begin{aligned} v_{xi}(t) &= p_{xi}(t) - p_{xi}(t-1), \\ v_{yi}(t) &= p_{yi}(t) - p_{yi}(t-1), \end{aligned} \quad (4)$$

其中, $v_{xi}(t)$ 和 $v_{yi}(t)$ 分别为隐鸢 i 在 X_g 方向和 Y_g 方向上的飞行速度. 以隐鸢的质心为个体坐标系的中心, 身体的对称轴线为 X_p 轴, X_p 与 X_g 间的夹角 $\psi_i(t)$ 为隐鸢 i 的飞行航向. 根据隐鸢在各个方向上的飞行速度, 可得隐鸢的飞行航向为

$$\psi_i(t) = \arctan \left(\frac{v_{yi}(t)}{v_{xi}(t)} \right). \quad (5)$$

根据式(4), 可得隐鸢飞行航向的变化轨迹如图2所示. 从图2和3可以看出, 隐鸢在迁徙过程中, 存在着

图1 (网络版彩图)隐鸢迁徙轨迹

Figure 1 (Color online) The migratory trajectories of 14 ibises.

图 2 (网络版彩图) 隐鸢在 $X_g O_g Y_g$ 平面的航向图

Figure 2 (Color online) The heading of the ibises in the $X_g O_g Y_g$ plane.

图 3 (网络版彩图) 隐鸢航向轨迹

Figure 3 (Color online) The heading trajectories of the ibises.

较多的集体转向, 即使在较大转向的情况下, 14 只隐鸢的飞行航向也基本保持一致。使隐鸢群体发生较大转向的原因可能是在外界刺激下的应激转向, 也可能是群体内部自发地进行的转向。

3.2 隐鸢群中的信息存储及传递

为了更加清晰和直观分析隐鸢群中信息传播过程, 将航向作为计算显著度值的特征属性。从隐鸢的航向时间序列中计算出每对隐鸢之间的 LTE 和 LAIS。令 ψ_s 为信息源隐鸢的航向序列, ψ_d 为信息宿隐鸢的航向序列, 则式(1)和式(2)中, $x_n = \psi_d(n)$, $y_n = \psi_s(n)$ 。对于每一只隐鸢, 根据式(1)和(2)计算来自所有其他邻居的 LTE 和 LAIS, 从而确定隐鸢个体航向的变化如何在群体中传播, 理解隐鸢集体航向转变, 其流程如图 4 所示。

由式(1)和式(2)可知, LTE 和 LAIS 的计算包括参数确定、节点概率密度的估计以及熵值计算。计算传递熵需要知道各相关时间序列的概率, 由于缺乏相关的

先验知识, 本文使用核估计来计算相关变量的概率分布函数^[10]。

4 结果及讨论

从如图 1 所示的隐鸢飞行轨迹可以看出, 由于各种不确定因素、外界刺激的存在, 某些隐鸢个体的飞行航向会与整体的平均航向有所偏离, 但最终整个隐鸢群体朝着一个共同方向运动。为了解隐鸢群体在进行群集运动时的信息处理动态, 如图 1 所示的迁徙轨迹中的 B 区域和 C 区域中包含着显著的集群转向过程, 因此本文主要对这两个区域进行分析。

4.1 Case 1 仿真结果

对如图 1 所示的 B 区域的隐鸢运动进行分析, 将式(1)和(2)中的参数设置为: $k = 20$, $l = 5$, $\tau = 3$, 选取核估计来计算相关变量的概率分布函数, 根据式(1)和(2)可计算出该区域隐鸢的局部传递熵和局部有效信息存储, 计算结果如图 5~9 所示。

图 5 和 6 为群体中其他隐鸢个体向单个隐鸢个体 (2 号隐鸢) 传播的局部传递熵的变化曲线, 局部传递熵表示了隐鸢个体间的信息传递随着时间在隐鸢群体中的动态变化过程。在图 6 中, 横坐标表示时间, 曲线代表不同的隐鸢个体的航向变化过程, 实心圆圈为由不同的隐鸢个体指向 2 号隐鸢的局部传递熵值, 即输入 2 号隐鸢的局部传递熵。从图中可以看出, 从信息源隐鸢到信息宿隐鸢的传递熵的值可以是正的也可以是负的。正的局部传递熵表示在给定信息宿隐鸢航向信息的情况下, 信息源隐鸢对信息宿隐鸢当前航向存在正影响, 即信息宿隐鸢的运动受到周围邻居个体的强烈影响。

图4 (网络版彩图)流程图

Figure 4 (Color online) Flow chart.

图5 (网络版彩图)其他隐鸮到2号隐鸮的局部传递熵

Figure 5 (Color online) The LTE transformed from the other ibises to the second ibis.

图6 (网络版彩图)其他隐鸮到2号隐鸮的局部传递熵和隐鸮航向轨迹

Figure 6 (Color online) The LTE transformed from the other ibises to the second ibis and the heading trajectories of the ibises.

反之, 当局部传递熵 $LTE_{y \rightarrow x}(n, \tau)$ 的值取负值时, 即 $LTE_{y \rightarrow x}(n, \tau) < 0$, 根据如式(1)所示的局部传递熵的定

图7 (网络版彩图)2号隐鸮向其他隐鸮输出的局部传递熵

Figure 7 (Color online) The LTE transformed from the second ibis to the other ibises.

义可知 $p(x_n | \mathbf{x}_{n-1}^k, y_{n-\tau}^l) < p(x_n | \mathbf{x}_{n-1}^k)$, 依赖于信息源的信息宿下一次时刻状态的概率小于独立于信息源的信息宿下一时刻状态的概率. 在该情况下, 信息源隐鸮实际上是误导了信息宿隐鸮的状态转移过程, 信息源隐鸮对信息宿隐鸮下一时刻的状态提供了错误的信息^[12]. 图7为2号隐鸮向群体中的其他隐鸮输出的局部传递熵, 图8表示在隐鸮集体运动过程中输入各个体的平均局部传递熵, 为个体的所有输入局部传递熵在指定时刻点的平均值. 从图6~8可以看出, 在隐鸮的迁徙转向运动中, 当隐鸮群体的转向非常明显时, 局部传递熵的强度增加, 当隐鸮的航向基本保持一致时, 局部传递熵的强度很低. 由于隐鸮在这段时间内并没有精确地做匀速运动, 所以将这些少量的信息传递解释为足够支持群体保持集体航向的动力.

图9为隐鸮的局部有效信息存储变化曲线, 从图中可以看出隐鸮个体的历史状态序列对当前时刻的状态存在反馈效应, 隐鸮会从历史状态中吸取和整合信息, 根据此前的知识做出决策, 通过知识的积累, 实现群体有序性。

4.2 Case 2 仿真结果

对如图1所示的C区域的隐鸮运动进行分析, 采用同样的方法来计算局部传递熵和有效信息存储, 计算结果如图10~14所示。

图10和11为群体中其他隐鸮个体向1号隐鸮传播的局部传递熵的变化曲线。在图11中的左下角给出了时间为2588.2 s时刻的信息传递拓扑图, 实线箭头表示当前时刻该个体未向1号个体传递信息, 反之, 粗虚线箭头则表示相应的个体向1号个体传递了信息。图12为2号隐鸮向群体中的其他隐鸮输出的局部传递熵, 图

图 8 (网络版彩图) 隐鸮集体转向时输入各个体的平均局部传递熵

Figure 8 (Color online) The average LTE input to every ibis during collective turns.

图 9 (网络版彩图) 隐鸮的局部有效信息存储

Figure 9 (Color online) The LAIS of the ibises.

13表示在隐鸮集体运动过程中输入各个体的平均局部传递熵, 为个体的所有输入局部传递熵在指定时刻的

图 10 (网络版彩图) 其他隐鸮到1号隐鸮的局部传递熵及航向轨迹

Figure 10 (Color online) The LTE transformed from the other ibises to the first ibis and the heading trajectories of the ibises.

图 11 (网络版彩图) 其他隐鸮到1号隐鸮的局部传递熵及信息传递拓扑

Figure 11 (Color online) The LTE transformed from the other ibises to the first ibis and the topology of information transformation.

图 12 (网络版彩图) 1号隐鸮向其他隐鸮输出的局部传递熵

Figure 12 (Color online) The LTE transformed from the first ibis to the other ibises.

图 13 (网络版彩图) 隐鸢集体转向时输入各个体的平均局部传递熵

Figure 13 (Color online) The average LTE input to every ibis during collective turns.

图 14 (网络版彩图) 隐鸢的局部有效信息存储

Figure 14 (Color online) The LAIS of the ibises.

平均值. 从图10和11可以看出, 在隐鸢的迁徙转向运动中, 当隐鸢群体的转向非常明显时, 局部传递熵的强度增加, 当隐鸢的航向基本保持一致时, 局部传递熵的强度很低. 由于隐鸢在这段时间内并没有精确地做匀速运动, 所以将这些少量的信息传递解释为足够支持群体保持集体航向的动力.

图14为隐鸢的局部有效信息存储变化曲线, 从图中可以看出隐鸢个体的历史状态序列对当前的状态存在反馈效应, 能从历史状态中积累经验, 并依此做出决策, 且随着信息传播的深入, 越来越多的个体参与到集体计算中, 集体记忆不断增长, 最终创造出协调的群集运动.

4.3 群体智能激发汇聚

信息作为形成群体智能的基本要素, 理解生物群

集行为中的信息处理过程对于揭示生物群体智能的产生机理及内在作用机制具有重要意义. 通过借鉴信息论的各种概念和度量方法, 我们可以对生物群集行为中的一些问题进行量化. 上述隐鸢群体航向调整过程中潜在信息流传递的研究结果表明, 隐鸢群体迁徙过程中的航向调整是群体智能的不断激发汇聚的结果.

(1) 在隐鸢群集运动中, 信息不断地被传递、存储. 当群体内部各要素之间的协调作用发生变化或者由于外部环境对群体的不可控输入达到一定程度时, 隐鸢群体在宏观层面上表现出某种程度的紊乱, 表现出群体有序性减弱、无序性增强, 将隐鸢群体的这种状态, 定义为熵增过程, 即群体智能激发过程, 在该过程中, 熵不断增加, 当熵达到最大值时, 隐鸢群体将出现严重混乱无序.

(2) 当隐鸢群中个体因为不确定因素或外界刺激导致航向发生变化时, 群体的有序性减弱、无序性增强, 通过群体中个体间信息的动态传播, 个体按照一定的规律运动, 调整航向, 从而使群体有序地组织起来. 即隐鸢群体可通过自组织与不断地适应, 历经不同的复杂的变化, 从无序向优化的、高级的秩序演进. 将隐鸢群体的这种状态, 定义为熵减过程, 即群体智能汇聚过程, 在该过程中, 隐鸢群体能够从外界获取“负熵”, 使熵值减小.

5 总结

本文采用信息论的方法来对迁徙过程中的隐鸢进行群体决策时的信息处理过程进行研究. 首先采用局部传递熵来测量隐鸢个体飞行航向受群体中其他个体飞行航向的影响程度, 然后采用局部有效信息存储来研究隐鸢的飞行航向对群体记忆的依赖程度. 通过对14只隐鸢的迁徙数据进行分析可知, 当群体遭受外界刺激或者内部个体发生波动时, 系统局部传递熵的强度增加, 表明群体中个体的波动被其他个体所注意到, 并将其当作特定的行为模式, 并在群体中进行传播以影响其他个体的行为, 群体产生明显的转向行为. 此外, 隐鸢的历史状态序列对当前时刻的状态存在反馈作用, 隐鸢会从历史状态中吸取和整合信息, 并根据此前的信息做出决策.

参考文献

- 1 Duan H B, Li P. Autonomous control for unmanned aerial vehicle swarms based on biological collective behaviors (in Chinese). *Sci Tech Rev*, 2017, 35: 17–25 [段海滨, 李沛. 基于生物群集行为的无人机集群控制. *科技导报*, 2017, 35: 17–25]
- 2 Vicsek T, Czirók A, Ben-Jacob E, et al. Novel type of phase transition in a system of self-driven particles. *Phys Rev Lett*, 2006, 75: 1226–1229
- 3 Reynolds C W. Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model. *SIGGRAPH Comput Graph*, 1987, 21: 25–34
- 4 Couzin I D, Krause J, James R, et al. Collective memory and spatial sorting in animal groups. *J Theor Biol*, 2002, 218: 1–11
- 5 Duan H B, Qiu H X. Unmanned Aerial Vehicle Swarm Autonomous Control Based on Swarm Intelligence (in Chinese). Beijing: Science Press, 2018 [段海滨, 邱华鑫. 基于群体智能的无人机集群自主控制. 北京: 科学出版社, 2018]
- 6 Schreiber T. Measuring information transfer. *Phys Rev Lett*, 2000, 85: 461–464
- 7 Lizier J T, Prokopenko M, Zomaya A Y. Local information transfer as a spatiotemporal filter for complex systems. *Phys Rev E*, 2008, 77: 026110
- 8 Wang X R, Miller J M, Lizier J T, et al. Quantifying and tracing information cascades in swarms. *PLoS ONE*, 2012, 7: e40084
- 9 Orange N, Abaid N. A transfer entropy analysis of leader-follower interactions in flying bats. *Eur Phys J Spec Top*, 2015, 224: 3279–3293
- 10 Lizier J T. JIDT: An information-theoretic toolkit for studying the dynamics of complex systems. *Front Robot AI*, 2014, 1: 1–20
- 11 Rosenthal S B, Twomey C R, Hartnett A T, et al. Revealing the hidden networks of interaction in mobile animal groups allows prediction of complex behavioral contagion. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2015, 112: 4690–4695
- 12 Crosato E, Jiang L, Lecheval V, et al. Informative and misinformative interactions in a school of fish. *Swarm Intell*, 2018, 12: 283–305
- 13 Butail S, Mwaffo V, Porfiri M. Model-free information-theoretic approach to infer leadership in pairs of zebrafish. *Phys Rev E*, 2016, 93: 042411
- 14 Butail S, Porfiri M. Detecting switching leadership in collective motion. *Chaos*, 2019, 29: 011102
- 15 Mwaffo V, Keshavan J, L. Hedrick T, et al. Detecting intermittent switching leadership in coupled dynamical systems. *Sci Rep*, 2018, 8: 10338
- 16 Garland J, Berdahl A M, Sun J, et al. Anatomy of leadership in collective behaviour. *Chaos*, 2018, 28: 075308
- 17 Lizier J T, Prokopenko M, Zomaya A Y. Local measures of information storage in complex distributed computation. *Inf Sci*, 2012, 208: 39–54
- 18 Voelkl B, Portugal S J, Unsöld M, et al. Matching times of leading and following suggest cooperation through direct reciprocity during V-formation flight in ibis. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2015, 112: 2115–2120

Anatomy of information transfer for Ibis using transfer entropy and active information storage

CHEN Lin¹, DUAN HaiBin^{1,2} & FAN YanMing³

¹ *Bio-inspired Autonomous Flight Systems Research Group, School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China;*

² *Peng Cheng Laboratory, Shenzhen 518055, China;*

³ *Shenyang Aircraft Design and Research Institute, Aviation Industry Corporation of China (AVIC), Shenyang 110035, China*

As birds migrate in a linear formation, the frequent exchange of leader-follower in the Ibises can extend the formation flight time. In this paper, we utilize the information theory to analyze the underlying mechanism of the coordination and cooperation within the Ibises. To this end, we examine and quantify the dynamic characteristics of the information transfer in a group of Ibises at the individual level. Firstly, the local transfer entropy is employed to quantify the local dynamic information transfer during the migration of the Ibises. Therefore, we provide lucid explanations of how Ibis individually influences the group decision through information transfer to generate consistent collective behavior. The local active information storage is used to represent the memory of the Ibis. The relationship between the consistency of the collective behavior and the memory of the Ibis is obtained by calculating the mutual information between the historical state sequences and the future state of the Ibis. Finally, based on the dynamic information transfer, the relationship between the group memory and the consistent collective behavior, we effectively captured the relationship between the excitation and convergence of the Ibis' collective behavior, and the variance of entropy is obtained.

local transfer entropy, Ibis, information transfer, local active information storage, group memory

doi: [10.1360/SST-2019-0312](https://doi.org/10.1360/SST-2019-0312)