

从鸟群群集飞行到无人机自主集群编队

邱华鑫,段海滨[✉]

北京航空航天大学飞行器控制一体化技术重点实验室仿生自主飞行系统研究组,北京 100083
[✉]通信作者, E-mail: hbduan@buaa.edu.cn

摘要 无人机可通过自主集群编队提高其在复杂环境下执行任务的能力. 多飞行器并存导致系统协调管理难度提升等一系列问题,因此如何设计合理高效的无人机集群编队协调自主控制算法是一个亟待解决的难点问题. 在鸟群群集飞行过程中,个体通过遵循简单行为规则进行相互合作而产生复杂有序的集体行为. 由于鸟群群集飞行过程中所表现出的邻近交互性、群体稳定性和环境适应性等特点与无人机集群编队的自主、协调和智能等控制要求有着紧密的契合之处,因此,研究鸟群群集飞行机制,并将其映射到无人机集群系统,是解决无人机集群编队协调自主控制问题的一条切实可行的途径.

关键词 无人机; 集群编队; 自主控制; 群集运动; 协调决策

分类号 V249.1

From collective flight in bird flocks to unmanned aerial vehicle autonomous swarm formation

QIU Hua-xin, DUAN Hai-bin[✉]

Bio-inspired Autonomous Flight Systems Research Group, Science and Technology on Aircraft Control Laboratory, Beihang University, Beijing 100083, China

[✉]Corresponding author, E-mail: hbduan@buaa.edu.cn

ABSTRACT The mission abilities of unmanned aerial vehicles (UAVs) under complex environments will be improved by autonomous swarm formations. The coexistence of multiple aircrafts raises a series of problems, such as growing difficulties in coordinated managements. As a result, the design of the UAV swarm formation coordinated autonomous control algorithm is an urgent and crux problem. During the process of collective flight in bird flocks, complex and orderly collective behaviors emerges after the cooperation among individuals based on simple behavior rules. Due to the agreement between the autonomous, coordinated and intelligent control requirements of UAV swarm formations and the characteristic of bird flock collective flight such as adjacent interactions, group stabilities and environment adaptations, the study on the mechanism of collective flight in bird flocks and the mapping relationship between bird flocks and UAV swarm systems will give a feasible way to solve the UAV swarm formation coordinated autonomous control problem.

KEY WORDS unmanned aerial vehicle; swarm formation; autonomous control; collective motion; coordinated decision

无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)是一种由自身程序控制或由无线电遥控的,用来执行特定任务的无人驾驶飞行器^[1]. 在执行枯燥、恶劣和危险(the dull, the dirty and the dangerous 3D)的任务^[2]时,无人

机相比于有人机能够体现出更大的优势. 机上无人、任务复杂以及动态不确定环境决定了无人机系统势必朝着集群化、自主化和智能化方向发展. 无人机自主集群编队飞行就是多架具有自主能力的无人机按照

收稿日期: 2016-10-13

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目(61425008); 国家自然科学基金资助项目(61333004); 北京航空航天大学博士研究生卓越学术基金资助项目(2016年度)

一定结构形式进行三维空间排列,且在飞行过程中可保持稳定队形,并能根据外部情况和任务需求进行队形动态调整,以体现整个机群的协调一致性.虽然无人机集群编队飞行可提高系统性能,但多个飞行器并存也导致了一些新的问题^[3-4],比如系统协调管理的难度提升,系统整体状态的不确定性增加,系统对通信的依赖性加大,因此设计合理高效的无人机集群编队协调自主控制算法至关重要.

生物群集行为是自然界中存在的一种普遍现象,是群居性生物群体为适应生存环境,历经长期演化后与生俱来的生存本领^[5].而在众多生物群集行为中,鸟群群集行为是一种较易观察,且具有较高研究价值的生物学现象.从结果来看,鸟群通过个体决策,最终使得整个鸟群从宏观上涌现出自组织性、协作性、稳定性及对环境的适应性.无人机自主集群的目的则是通过分布式决策实现能够自组织、协调性好和鲁棒性强的编队飞行.由于鸟群群集行为去中心化的邻近个体

交互、整体的自组织性等特点与无人机自主集群编队协调控制的局部性、分布式和鲁棒性等要求有着紧密的契合之处^[6-8],因此,研究鸟群群集飞行机制,并将其映射到无人机集群系统中,是解决无人机集群编队协调自主控制问题的一条切实可行的途径.

1 鸟群群集飞行

1.1 鸟群群集机制

鸟类群集过程(如图 1 所示)中存在的有组织飞行大致可分为两种方式^[9],一种多为大型鸟类所采用的线性编队(line formation)飞行,另一种多为小型鸟类所采用的群集编队(cluster formation)飞行,本文主要关注鸟群群集编队飞行方面的研究.采用群集编队飞行方式的鸟类并不具备较高的个体智能,但其行动高度协调一致,可在飞行过程中同步、快速的改变飞行方向,对于鸟类群集编队飞行过程中如何协调一致的内在成因近些年来一直为相关研究者所关注.



图 1 自然界中的鸟群群集行为(图片来自摄图网,作者分别为 makammos2303 和 tpsdave)

Fig. 1 Collective flight behaviors in natural bird flocks (the two images are respectively from makammos2303 and tpsdave in 699pic.com)

2008 年, Ballerini 等^[10]利用计算机视觉技术记录了欧棕鸟群中特定个体的三维位置,并发现鸟群中个体分布存在各向异性,且该种特性仅出现在距其最近的 6~7 个个体范围内,从而推测在规模巨大的欧棕鸟群中,个体采用拓扑距离(topological distance)交互方式,即与其最近的 6~7 个个体进行交互,而非传统认为的模式距离(metric distance)交互方式(与特定空间范围内的个体相互作用),进而可知每个个体的拓扑交互范围会随着群体分布密度的降低而升高.2010 年, Cavagna 等^[11]利用立体成像技术得到了欧棕鸟群的高精度空间位置信息,以研究大规模鸟群对外界扰动的响应情况.研究发现,个体间的相互作用强度随着个体间距离的增加按照一个指数很小的幂函数衰减,即单个个体的行为可间接影响到很远距离以外的其他个体,因而个体的间接感知范围远大于个体的直接交互范围.4 年后, Attanasi 等^[12]进一步发现鸟群中的每个个体具有自旋属性,可通过对比彼此的自旋来

保证整个鸟群的总自旋,即鸟群间的交互信息主要为邻近个体的转向幅度,而非邻近个体的飞行方向.同年, Pearce 等^[13]给出了一种鸟群群集编队形成原因的新观点:鸟群中的个体通过对由暗色的鸟和其背后的明亮天空所形成的图案构成视觉线索做出反应,来维持一个理想的鸟群不透明度.

2014 年, Nagy 等^[14-15]利用 GPS 设备获取鸽群的飞行轨迹,并通过求取不同时刻鸽子间的速度内积获得速度关联程度.研究发现,鸽群中的个体除头鸽外,其余跟随者也存在相应的飞行领导等级(flight leadership rank),位于低级的个体其行为不仅会受到头鸽的影响,也会受到其等级之上个体的影响,而往往来自于临近上级个体的影响更为直接迅速.该复杂多层网络结构比之其他网络结构(平等类型或者双层结构)的明显优势在于,信息传递更高效迅速.层级网络结构是个体不断优化自身利益的结果,鸟群中的个体会依据具体任务和情景使用不同的层级结构.鸽群中目前

发现的层级网络结构除上面提到的飞行领导等级外,还包括啄序等级(pecking order rank)。啄序等级是由个体能特征确定的,比如攻击以及获取食物的能力,飞行领导等级的确定成因尚不明确,不过推测稳定的飞行领导等级也是由某种个体能力差异确定的^[16]。同年,Zhang等^[17]在Nagy等的研究基础上,发现鸽群在飞行中实际上混合了听从高等级鸽子和听从最近邻居两种策略。在飞行方向方面,当飞行轨迹平滑时,个体尽力与周围邻居的平均方向保持一致,当出现突然的急转弯变向时,个体迅速和高等级个体保持一致;而在飞行速度方面,周围邻居比高等级个体对个体的影响更大。2015年,Yomosa等^[18]在以往研究基础上进一步发现鸽群在群体转弯中存在的两种模式,等半径转弯(equal-radius type turning)和平行路径转弯(parallel-path type turning),并指出在转弯角度较大或受突发状况扰动时鸽群倾向于采用等半径转弯模式。

1.2 鸟群群集运动模型

为探索鸟群由简单局部个体行为产生复杂全局协调行为的内在机理,相关研究者尝试建立鸟群群集运动模型和协调决策模型以描述上述鸟群分布式信息交互机制。其中鸟群协调决策建模方面的研究工作相对较少,值得一提的是Nepusz和Vicsek^[19]尝试通过建立群体协调决策模型以解释鸽群层级网络结构的成因,模型中个体通过指定、接受指定、传播以及决策与反馈四步操作进行群体协调决策,进而形成群体协调决策后的副产品——层级网络结构。

相较于鸟群协调决策模型方面的研究,其群集运动模型方面的研究起步较早,最早为人所熟知的群集运动模型——Boid模型是由Reynolds于1986年提出的^[20],该模型内个体可感知周围一定范围内邻近个体的飞行信息,并遵从三种基本行为准则——聚集(cohesion)、分离(separation)和对齐(alignment),指导其做出下一步的飞行决策。在Reynolds提出的群集运动模型设计三原则的基础上,大批群集运动模型应运而生,其中较为经典的是Vicsek模型、Couzin模型以及Cucker-Smale模型。Vicsek模型^[21]中个体速度大小不变,其速度方向为邻域内所有个体速度方向的平均。通过对Vicsek模型进行适当修改可以得到一些群体同步效果更强的群集运动模型,比如个体对邻居影响程度不同^[22],个体速度大小可变^[23]。与Reynolds作法(采用相互重叠的感知区域)不同,Couzin等^[24]将个体感知区域划分为三个分别对应于三原则的互不重叠区域——吸引区、取向区和排斥区,并发现通过改变区域大小群体会呈现出不同的状态,比如蜂拥态(swarm)、漩涡态(torus)和平行群体(parallel group)。Cucker和Smale^[25]采用邻接矩阵描述个体间相互作用强度,提出了着重描述个体间速度相互影响的模型,该模型与

Vicsek模型一样仅考虑了三原则中的对齐原则。

在以上研究基础上,Cavagna等^[26]尝试建立更一般性理论来统一群集运动模型。需要补充说明的是,此前广泛使用的Vicsek模型是Toner和Tu^[27]基于金兹堡-朗道理论提出的TT方程的特例,此外Cavagna等^[28]此前提出的惯性自旋模型(inertial spin model,ISM)的自旋过阻尼极限等价于Vicsek模型,因此Cavagna等认为更一般模型需要满足的条件是其自旋过阻尼极限等价于TT方程。新模型^[26]的建模思想是把鸟类个体当作一个大型流体场中的液体成分,自旋波和密度波均存在于场中:鸟群飞行时彼此间会保持固定距离,当一只鸟位置变化时,其邻居会调整自身位置,从而造成鸟群中密度的波动,产生一阵向外的密度波,从而起到通讯作用;当一只鸟改变飞行方向时,其周围的所有鸟都随即改变方向,这一信息向外传播,类似于磁性材料中的自旋波。

2 鸟群群集与无人机集群的映射机制

鸟群与无人机集群系统在任务环境和任务需求上存在着较大的相似性,因此鸟群群集行为机制对于无人机集群编队协调自主控制具有很多借鉴意义:首先,因任务环境相似,二者所受到的干扰因素(比如强光照、厚云层以及不稳定气流等)基本相同,鸟群系统中的群集运动机制对于这类特性环境噪声的抗干扰性恰恰也是设计无人机集群系统协调控制算法所需要的;同时,也因任务环境均要求二者只能在运动中进行交互^[29],故而比之于一般陆地群体的单一首领机制,鸟群中的通讯拓扑对于无人机集群系统更具有借鉴意义。鸟类个体由于通讯距离和视野限制在飞行过程中不能实时发现头鸟,并进行实时跟随,因此必须参照通讯范围内的其他个体,并受其影响,如果无人机集群规模庞大,在编队过程中依然采用集中式控制方式,则不能保证长机时刻处于每架僚机的通讯范围内,因此必须建立僚机与其他僚机间的通讯联系,或者采用分布式控制方式;此外,二者在任务需求上均需要实现在避免个体发生碰撞的基础上,尝试与邻居个体保持接近,同时与其速度一致。无论从鸟群群集行为机制所表现出的聚集、分离和对齐行为来看,还是从其所隐含的鲁棒、稳定和可扩展特性来讲,研究鸟群内部的交互机制(交互集合、交互信息以及交互信息处理)对于实现无人机集群编队协调自主控制具有指导意义。

类似于鸟群在空中飞行,无人机集群飞行中不可避免地会遭遇各种突发事件,比如作战目标改变、威胁等外部环境的动态变化、编队成员战损等,因此需要针对以上情况进行编队动态调整以实现整体编队保持并继续执行任务。鸟类个体对于外界变化环境具有一定

的适应能力,对环境状态会有自身判断,并采取相应的个体应急措施.鸟群中的鸟类个体面对动态变化的环境其应急措施不再仅仅是个人行为,而是个体通过局部协调决策规则参与群体决策而最终产生的群体应急措施.在协调决策的过程中,个体依据以往交互经验,选择听取对于环境适应能力较强的邻居个体意见,并给予对环境适应能力较弱的邻居个体以自身应急方案,从而形成一个存在于不平稳飞行状态下的飞行领导等级层级作用网络.该层级作用网络中个体间并不是两两均可构成联系,且个体并不是仅与群体内的唯一个体存在联系.映射到多无人机的编队协调控制,该机制既可节省单机系统中通讯模块的占用空间,又可保证整个无人机集群系统的可靠性,使得在单架飞机出现故障后仍可编队重构,继续执行任务.此外,鸟群系统中的协调决策规则对于多无人机系统在突发状况

下的协调避障控制也具有一定的借鉴意义,二者均需要在没有中心节点的情况下,通过局部交互形成群体一致或是分群一致的避障策略,并在避障过程中个体间依然保持紧密但不发生碰撞,且群体状态协调一致,可以同步、快速的改变飞行方向.

综上所述,如图 2 所示,考虑鸟群群集运动所遵循的聚集、分离与对齐三个基本原则,针对欧椋鸟群和鸽群所共有的拓扑交互、鸽群所特有的层级引领以及策略切换等群集行为机制,可建立具有动态环境适应性的鸟群群集运动模型与协调决策模型.在此基础上,分别建立从鸟群群集运动模型到无人机集群编队构型参数设计及编队保持,和复杂动态环境下从鸟群协调决策模型到无人机集群实时避障策略生成及切换拓扑重构间的映射关系,进而实现基于鸟群群集行为机制的无人机集群编队协调自主控制.

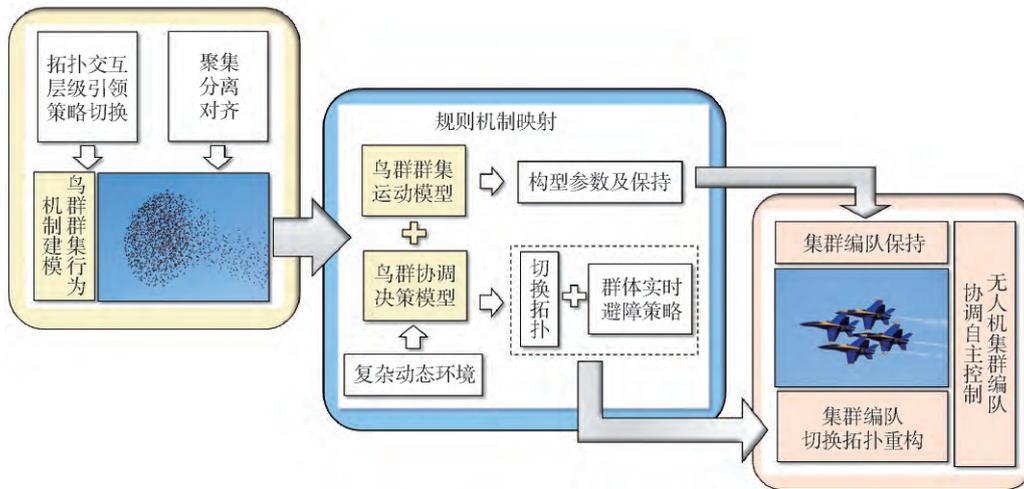


图 2 从鸟群群集飞行机制到无人机集群编队控制(图中两个图片来自 Dreamstime.com 作者分别为 Yoderrm 和 Murat Erhan Okcu)

Fig. 2 From the collective flight mechanism in bird flocks to UAV swarm formation control (the two images are respectively from Yoderrm and Murat Erhan Okcu in Dreamstime.com)

3 基于鸟群群集行为的无人机集群编队

基于鸟群群集行为机制的无人机集群编队控制方面的研究困难重重,近几年才陆续取得一些破冰式进展.2011年,Hauert等^[30]利用小型固定翼无人机作为实验平台,在 Reynolds 三原则控制基础上添加了迁徙(migration)控制,最终实现了无人机集群自主室外飞行任务.该集群验证工作的难点除无人机间通信范围受限外,还在于所选用的实验平台较之无人地面机器人或旋翼飞行器,需要始终保持一定的向前飞行速度,并且无法进行大角度的急转弯.2014年,Vásárhelyi等^[31]首次实现了多架四旋翼无人机的室外分布式完全自主编队飞行.该无人机集群框架同样受 Reynolds 提出的群集模型启发,无需地面站或者其他集中式数据处理与控制单元,所有计算过程均由各无人机上机载计算机完成.需要说明的是,以上两次室外集群飞

行并没有实现真正的机间避障,而是通过将各无人机保持在不同高度以防止机间发生碰撞. Virágh 等^[32]也在该工作基础上,进一步总结了无人机集群编队自主控制算法的最简模式,无人机个体模型需要考虑惯性、内部噪声、传感器更新延迟、数据处理时延、通讯局域性以及一般环境噪声,其速度控制分量大致可分为四项:趋于期望速度的控制分量、避障控制分量、对齐控制分量以及边界限制控制分量.当个体在规定区域内时,边界对个体存在斥力;在区域外时,边界限制控制分量使得群体中心趋向区域中心.2015年,Saska^[33]实现了小型旋翼无人机沿预设路径的集群避障运动,该集群中的无人机间不存在通信,完全依靠视觉信息进行机间定位,即仅依靠相对位置信息进行集群编队,因此该方法并不能实现复杂环境下的集群密集编队,也不满足 Reynolds 三原则中的速度对齐原则.笔者所在实验室在大量基于自然界中群体智能的多无人机编队

工作基础上^[34-37]将新发现的鸟群群集行为机制引入到了多无人机编队顶层控制中并进行了仿真验证^[29],日前正逐步尝试将相关理论成果在室外平台系统上进行飞行试验. 由此可见,现有的无人机集群编队控制基本采用 Reynolds 三原则控制框架,并且并未实现严格的机间避障,因此实现真正意义上的仿生无人机集群编队协调自主控制依然任重道远.

4 研究展望

目前关于鸟群群集飞行机制及其相关应用的研究方兴未艾,本文对于在该领域相关研究进展进行了简要概述,其研究特点可归纳为以下几个方面.

(1) 随着生物群体系统观测手段的不断革新,所记录的个体相关位置及其运动轨迹信息更加精准,使得对鸟群群体系统内在群集飞行机制的揭示上出现了很多值得关注的研究成果,比如鸽群内部飞行领导等级层级网络结构,这类研究成果进一步印证前人推断的同时,也得出了与以往研究相悖的结论,比如 Turner 关于鸟群群集形成的新假说——通过保持边缘不透明状态形成群集.

(2) 现有鸟群群集运动模型的建模思想依然停留在 Reynolds 在 Boid 模型中引入的三条基本原则,较少考虑最新发现的相关鸟群群集飞行机制,缺乏更加真实地反应鸟群群集运动规律的模型研究,此外在鸟群群体协调决策建模方面的研究工作相对较少,尚不成熟.

(3) 随着关于鸟群群集飞行机制研究的深入,这些仿生行为机制已被逐渐应用到多智能体群集运动的协调控制领域,但对于真正实现无人机集群系统的分布式自主协调控制,目前仍然缺乏有说服力的成果.

对于鸟群群集飞行机制及其应用的研究,尽管近二十余年来有着众多突破性的研究进展,但仍然存在许多问题有待进一步深入研究:

(1) 快速、经济和高质量的个体位置、速度和姿态观测技术——随着鸟群群集飞行现象研究的不断深入,大规模群体行为观测的需求和必要程度亦与日俱增,随着观测规模、精度要求的逐渐加大,现有观测方法的经济性、精度和快速性等都将面临挑战,因而寻求新的个体位姿测量技术十分必要.

(2) 异构群集运动模型的研究——迄今为止,绝大多数鸟群系统群集运动以及多智能体协同方面的研究均假设被研究群体是由结构和功能相近的个体所组成,但事实上,群体内不同的物种,以及同物种内年龄、性别和健康状况等特性的不同均使得不同个体在群体中的表现有所区别,因而群集运动行为中异构模型的研究不但具有理论价值,更具有实际意义.

(3) 将个体学习行为引入群集运动模型的研究

——现有群集运动模型大多仅关注群体单次或短期性行为,事实上个体通过学习行为对群体行为形成的反馈机制,是使得群集行为表现出自适应和累积性的关键,也是理解群集系统的关键^[38],比如鸽群内部的飞行领导层级网络就是领导、学习以及个人能力综合作用的结果.

(4) 鸟群群集飞行机制的应用——由多个智能体,如无人机,无人地面机器人等组成的多智能体系统,能以更低廉的代价和更优良的性能完成单个智能体难以完成的任务. 随着多无人机等多智能体系统在侦察、搜救和协同作战等方面应用的日益广泛和深入,多智能体协同机制的理论与应用研究均有着巨大的发展潜力,基于鸟群群集运动和协调决策机制的多智能体协调自主控制研究无论是民用还是军用都将有着更大的发展空间.

5 结束语

自然界中的鸟群群集行为蕴含着独特的机制,个体可通过遵循简单局部交互规则形成协调有序的群体. 通过借鉴鸟群群体智慧,采用分布式策略设计多智能体协调控制算法,可为多无人机协调控制提供一条可行途径. 鸟群群集行为机制的研究催生出多智能体控制领域相关研究的同时,控制理论又为理解和证明鸟群群集行为机制的合理性和有效性提供了理论支撑. 目前对鸟群群集行为机制的研究仍处于初级阶段,无论是对其行为机制理论基础的研究,还是对其应用领域的拓展都有待进一步的深入.

参 考 文 献

- [1] Peng Z H, Sun L, Chen J. Online path planning for UAV low-altitude penetration based on an improved differential evolution algorithm. *J Univ Sci Technol Beijing*, 2012, 34(1): 96
(彭志红, 孙琳, 陈杰. 基于改进差分进化算法的无人机在线低空突防航迹规划. 北京科技大学学报, 2012, 34(1): 96)
- [2] Lundquist E H. Drone duties: the dull, the dirty, and the dangerous. *Naval Forces*, 2003, 24(3): 20
- [3] You F C, Ma W X, Yang B R. Application of multi-agent technologies to the model design of knowledge discovery in database based on the double-bases cooperation mechanism. *J Univ Sci Technol Beijing*, 2003, 25(1): 95
(游福成, 马文秀, 杨炳儒. 多智能体技术在基于双库协同机制的知识发现 KDD* 模型设计中的应用. 北京科技大学学报, 2003, 25(1): 95)
- [4] Liu C, Zhou Q, Hu X G. Consensus control of discrete-time heterogeneous multi-agent systems. *Chin J Eng*, 2016, 38(1): 143
(刘聪, 周强, 胡晓光. 离散时间异质多智能体系统的一致性控制. 工程科学学报, 2016, 38(1): 143)
- [5] Cheng D Z, Chen H F. From swarm to social behavior control. *Sci Technol Rev*, 2004, 22(0408): 4
(程代展, 陈翰馥. 从群集到社会行为控制. 科技导报, 2004,

- 22: 4)
- [6] Duan H B, Shao S, Su B W, et al. New development thoughts on the bio-inspired intelligence based control for unmanned combat aerial vehicle. *Sci China Technol Sci*, 2010, 53(8): 2025
- [7] Duan H B. From swarm intelligence to multiple unmanned aerial vehicle autonomous control. *All Syst Control*, 2014, 1(2): 76 (段海滨. 从群体智能到多无人机自主控制. 系统与控制纵横, 2014, 1(2): 76)
- [8] Qiu H X, Wei C, Dou R, et al. Fully autonomous flying: From collective motion in bird flocks to unmanned aerial vehicle autonomous swarms. *Sci China Inf Sci*, 2015, 58(12): 1
- [9] Bajec I L, Heppner F H. Organized flight in birds. *Anim Behav*, 2009, 78(4): 777
- [10] Ballerini M, Cabibbo N, Candelier R, et al. Interaction ruling animal collective behavior depends on topological rather than metric distance: evidence from a field study. *Proc Nat Acad Sci*, 2008, 105(4): 1232
- [11] Cavagna A, Cimarelli A, Giardina I, et al. Scale-free correlations in starling flocks. *Proc Nat Acad Sci*, 2010, 107(26): 11865
- [12] Attanasi A, Cavagna A, Del Castello L, et al. Information transfer and behavioural inertia in starling flocks. *Nat Phys*, 2014, 10: 691
- [13] Pearce D J G, Miller A M, Rowlands G, et al. Role of projection in the control of bird flocks. *Proc Nat Acad Sci*, 2014, 111(29): 10422
- [14] Nagy M, Ákos Z, Biro D, et al. Hierarchical group dynamics in pigeon flocks. *Nature*, 2010, 464(7290): 890
- [15] Nagy M, Vásárhelyi G, Pettit B, et al. Context-dependent hierarchies in pigeons. *Proc Nat Acad Sci*, 2013, 110(32): 13049
- [16] Zafeiris A, Vicsek T. Advantages of hierarchical organization: from pigeon flocks to optimal network structures // *Research in the Decision Sciences for Global Business: Best Papers from the 2013 Annual Conference*. New Jersey: Pearson Education, 2015
- [17] Zhang H T, Chen Z Y, Vicsek T, et al. Route-dependent switch between hierarchical and egalitarian strategies in pigeon flocks. *Sci Rep*, 2014, 4: 5805
- [18] Yomosa M, Mizuguchi T, Vásárhelyi G, et al. Coordinated behaviour in pigeon flocks. *PLoS ONE*, 2015, 10(10): e0140558
- [19] Nepusz T, Vicsek T. Hierarchical self-organization of non-cooperating individuals. *PLoS ONE*, 2013, 8(12): e81449
- [20] Reynolds C W. Flocks, herds and schools: a distributed behavioural model. *ACM SIGGRAPH Comput Graphics*, 1987, 21(4): 25
- [21] Vicsek T, Czirók A, Ben-Jacob E, et al. Novel type of phase transition in a system of self-driven particles. *Phys Rev Lett*, 1995, 75(6): 1226
- [22] Yang W, Cao L, Wang X F, et al. Consensus in a heterogeneous influence network. *Phys Rev E*, 2006, 74(3): 037101
- [23] Li W, Wang X F. Adaptive velocity strategy for swarm aggregation. *Phys Rev E*, 2006, 75(2): 021917
- [24] Couzin I D, Krause J, James R, et al. Collective memory and spatial sorting in animal groups. *J Theor Biol*, 2002, 218(1): 1
- [25] Cucker F, Smale S. Emergent behavior in flocks. *IEEE Trans Autom Control*, 2007, 52(5): 852
- [26] Cavagna A, Giardina I, Grigera T S, et al. Silent flocks: constraints on signal propagation across biological groups. *Phys Rev Lett*, 2015, 114(21): 218101
- [27] Toner J, Tu Y H. Long-range order in a two-dimensional dynamical XY model: how birds fly together. *Phys Rev Lett*, 1995, 75(23): 4326
- [28] Cavagna A, Del Castello L, Giardina I, et al. Flocking and turning: a new model for self-organized collective motion. *J Stat Phys*, 2015, 158(3): 601
- [29] Qiu H X, Duan H B, Fan Y M. Multiple unmanned aerial vehicle autonomous formation based on the behavior mechanism in pigeon flocks. *Control Theory Appl*, 2015, 32(10): 1298 (邱华鑫, 段海滨, 范彦铭. 基于鸽群行为机制的多无人机自主编队. 控制理论与应用, 2015, 32(10): 1298)
- [30] Hauert S, Leven S, Varga M, et al. Reynolds flocking in reality with fixed-wing robots: communication range vs. maximum turning rate // *Proceedings of 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. San Francisco, 2011: 5015
- [31] Vásárhelyi G, Virágh C, Somorjai G, et al. Outdoor flocking and formation flight with autonomous aerial robots // *Proceedings of 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2014)*. Chicago, 2014: 3866
- [32] Virágh C, Vásárhelyi G, Tarcai N, et al. Flocking algorithm for autonomous flying robots. *Bioinspir Biomim*, 2014, 9(2): 025012
- [33] Saska M. MAV-swarms: unmanned aerial vehicles stabilized along a given path using onboard relative localization // *Proceedings of 2015 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*. Denver, 2015: 894
- [34] Duan H B, Luo Q N, Shi Y H, et al. Hybrid particle swarm optimization and genetic algorithm for multi-UAV formation reconfiguration. *IEEE Comput Intell Mag*, 2013, 8(3): 16
- [35] Duan H B, Luo Q N, Yu Y X. Trophallaxis network control approach to formation flight of multiple unmanned aerial vehicles. *Sci China Technol Sci*, 2013, 56(5): 1066
- [36] Qiu H X, Duan H B. Receding horizon control for multiple UAV formation flight based on modified brain storm optimization. *Nonlinear Dyn*, 2014, 78(3): 1973
- [37] Duan H B, Qiu H X, Fan Y M. Unmanned aerial vehicle close formation cooperative control based on predatory escaping pigeon-inspired optimization. *Sci Sin Technol*, 2015, 45(6): 559 (段海滨, 邱华鑫, 范彦铭. 基于捕食逃逸鸽群优化的无人机紧密编队协同控制. 中国科学: 技术科学, 2015, 45(6): 559)
- [38] Biro D, Sasaki T, Portugal S J. Bringing a time-depth perspective to collective animal behavior. *Trends Ecol Evol*, 2016, 31(7): 550