

仿自然界鸽群行为的无人机 集群自主控制

段海滨 北京航空航天大学

罗琪楠 中国电子科技集团公司 电子科学研究院

摘要：近年来，自然界中的鸟类群集行为机制特别是鸽群智能行为的建模与实用研究引起了鸟类学家、物理学家等众多领域学者的关注。鸟类特别是鸽子的群集行为所蕴含的内在机制以及运动、决策、信息传输模型体现出了自组织、自协调、智能涌现等特点，这些特点与无人机集群自主控制的需求十分吻合。本文对鸽群智能运动模型及行为规则进行了研究，并将鸽群智能映射到无人机集群系统中，进行了仿真分析和外场飞行验证，为解决无人机集群自主控制问题提供了一条新的技术途径。

1、引言

自然界中生物群体能够形成分布式、自组织与协调有序的运动，例如蚁群、蜂群、鱼群、鸽群能通过个体间的相互交流完成有序的群集运动^[1]，并在任务协作层面展现出十分严密的分工，充分利用群体优势提高任务完成效率^[2]。针对自然界中的群体智能行为的产生机理与群体运动模型，许多学者提出了一些建模理论方法与适用于简单智能体的集群运动模型^[3]。目前人们对于生物群体智能的认识有了很大进步，并将其初步应用于人工智能集群系统的设计与实现。

鸽子具有惊人的导航能力，对鸽群开展有针对性的实证化研究，是真正理解实际鸽群群集运动内在机理的必需步骤。就目前已取得的成果来看，实验对象已包括了长距离飞行及近距离盘旋等不同场景中鸽群层级引领、导航方向协商折中、

分层聚集等鸽群智能行为^[4]。由于佩戴式 GPS 定位跟踪设备的精度限制，在长距离飞行情况下鸽群的轨迹记录尚不精确，这对研究鸽群长距离飞行情况下的集群导航机理产生了一定的影响。在对近距离鸽群运动的数据采集方面，可以采用视频分析结合 GPS 定位跟踪的方式获取更加精确的飞行轨迹数据，包括相对位置/速度分布分析、运动关联性分析等。已有的研究表明鸽群中个体的飞行经验差异可能对集群飞行具有较大的影响，由于鸽群飞行经验较难通过定量的方式进行对比试验，在这方面的研究尚处于初步阶段。

鸽群在集群飞行中通过与环境 and 邻近同伴间的信息交互而适时地改变自身行为，以适应集群及环境的动态变化。在进一步研究鸽群行为准则时应该确定鸽群如何实现局部信息的交互，以及在发生冲突时采取的协作协商方式。鸽群在飞行

中具备紧密编队飞行和自主防撞能力,在进行导航时又具备多种导航机制,进食时也展现出特定的社会组织模式^[5]。研究鸽群的社会组织形式及行为机制,并分析领导者与跟随者如何通过简单的交互实现整体的协调,是理解并应用鸽群智能的关键技术途径。

关于鸽群集群智能飞行的研究成果为提出一种全新的鸽群优化算法提供了灵感和参考。利用鸽群智能进行各种人工集群系统的设计与构建,可为多无人系统集群的设计和运动协同控制提供启发,特别是对无人机集群提供协调机制的设计思路,并通过鸽群优化算法优化多无人机集群中的控制参数或硬件配置,以提高人工集群系统的任务执行效率^[6]。

此外,现有绝大多数关于生物群体智能运动模型的研究采用了简单智能体的运动模型,随着无人系统技术的发展,未来可能出现具备高度自主化与智能化的无人平台^[7],从而不能再简单地把无人系统集群中的成员视为简单或者完全平等的个体,需要针对具备不同智能程度与任务性能的无人系统进行仿生集群协调机制设计。综上,需要进一步探讨生物群体特别是鸽群的行为机制,建立可应用、可扩展的生物集群智能行为模型。

2、鸽群行为机制建模与分析

2.1 鸽群层级引领网络

在过去数十年间,传感器技术的迅猛发展使得精确测量自然界中鸽群个体的飞行轨迹成为了可能。在鸽群飞行过程中,群体的飞行轨迹体现出了个体的偏好轨迹与领导者的经验轨迹之间的折中等智能行为,通过研究鸽群个体的飞行轨迹变化,可以为建立鸽群运动模型提供观测数据支持,

加深对鸽群飞行策略的理解,揭示鸽群的通信网络机制及运动规则。

通过小型化佩戴式 GPS 定位装置获取鸽群在自由飞行和归巢飞行状态下的运动情况,可以对快速运动的鸽群中个体之间的相互影响机制进行研究,这种影响基于个体与群体之间产生的一种独特的富有经验的运动评估方法。定量对比鸽群 GPS 位置变化并进行统计学分析后可以发现,个体对相邻个体存在引领的作用(类似于势场力对个体的牵引作用),同时群体中存在着分层领导的策略,不同层级的鸽子只对相邻的层级产生较大的引领作用。研究鸽群智能行为及建立鸽群运动模型的前提是确定鸽群分层引领—跟随的网络结构,即鸽群层级引领网络(Hierarchical Leadership Network, HLN)模型,如图 1 所示的固定分层引领结构。图中 A、M、G、D、B、H、L、I、C、J 代表不同层级的鸽子,鸽子间带箭头的连线代表引领—跟随关系,连线上的数字代表引领时的固定时延大小。鸽群分层引领结构中的引领—跟随固定时延为全部 15 组飞行试验的平均固定时延,同时去除不足 5 组数据的引领—跟随关系,基于总数为 12 只的鸽群飞行数据建立 10 只鸽群的网络模型。

从层级网络图中不同鸽子间的引领—跟随关系及引领—跟随时延可以看出,处于最上层的领导者对大多数鸽子具有引领作用,处于最底层的跟随者则同时受到多个上层领导者的引领。随着引领—跟随层数的增加,引领—跟随的时延也不断增加,使得跨层的领导者对跟随者的实际引领作用减弱。综合多组自由飞行与归巢飞行的数据分析结果,在鸽群的层级网络中领导者与跟随者的位置基本保持在固定位置。

周围的邻居不能完全进入焦点个体的视场内。但由于个体的视线方向的调整,当前时刻位于个体视场外的邻居有可能在下一时刻进入到焦点个体的视场范围内。个体在运动过程中,前方各个相对方向上的邻居个体都会以一定的概率进入焦点个体的视场内。

通过对鸽群自由飞行与归巢飞行时个体与邻居的相对距离和相对加速度进行分析,可以得到鸽群中排斥力、队列一致和吸引力作用的空间分布与近似函数曲线。从鸽群相对位置分布及相对加速度曲线可以看出鸽群呈现出排斥力、队列一致和吸引作用的空间分布特点。在归巢飞行试验中,更上层的领导者处于集群的前方,邻居的相对位置在正后方分布。进一步根据相对加速度曲线建立相互作用力函数。

为了研究鸽群个体与邻居及环境变化的交互机制,基于鸽群数据分析,建立了改进的自驱动粒子模型对鸽群行为机制进行仿真建模。自驱动粒子模型中个体的状态由速度和速度方向决定,而速度和速度方向的变化受到邻居位置和运动方向的影响。通过对实际鸽群数据的分析,不同于传统的粒子模型,该模型中考虑速度变化产生的影响。通过模型仿真并调整邻居个体交互机制,可以一定程度上复现鸽群在特定飞行任务下的引领—跟随飞行模式和群体决策特性,并进一步研究个体在飞行性能上的差异带来的决策变化。

如图3所示,在鸽群长距离集群飞行时,领导者具有一定的航迹先验信息,因此能够引领整个鸽群以较短的距离到达目的地。当不同层级的鸽子在航向信息存在较大偏差或者鸽子间的相对距离较远无法形成有效的群体沟通时,鸽子间需要在较长的飞行距离内进行航向协商折中。在鸽

群模型中,个体的方向角变化率取决于邻居的位置和飞行方向,个体的速度变化取决于群体引领—跟随网络结构,当个体为领导者时,个体将自行调整速度跟随特定的航迹,当个体为跟随者时,个体的速度将跟随领导者变化,且个体跟随速度较快的领导者。

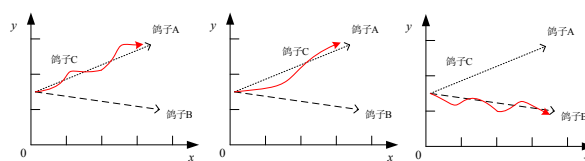


图3 鸽群航向协商折中机制

个体只受到处于一定方向角偏差内邻居的影响 ($|\theta| < 3/5\pi$)。当个体的感知范围内没有邻居时,个体具有一条特定的自主飞行轨迹。为了对鸽子间的航向信息冲突进行建模,将自主飞行轨迹定义为从当前点向左右分叉的两条直线轨迹。定义个体 i 的位置向量 $(x_i(t), y_i(t))$, 飞行方向 $\alpha_i(t)$, 和速度 $s_i(t+1)$ 。在每一时刻,个体 i 根据下列四个响应更新自己的飞行方向。

$$\alpha_i(t+1) = \alpha_i(t) + P_i(t) + O_i(t) + A_i(t) + E_i(t) \quad (2)$$

2.3 鸽群仿真结果及分析

在自由飞行仿真中,随机生成鸽群的初始位置和最高级领导者的速度方向,其余个体的初始速度沿最高级领导者的速度方向在 $[-30^\circ, 30^\circ]$ 内进行随机生成。设定鸽群的二维平面运动区域边长为 $L=20$, 鸽子的归一化速度上限为 $V_{max}=1$, 且具有周期性边界条件,设定每次仿真实验时间为 $t=300$ 。

仿真中鸽群由8只鸽子组成,采用拓扑网络

结构,在领导者采用不同轨迹进行引领飞行时,鸽群的三维运动轨迹及飞行速度状态的变化情况如图4所示。

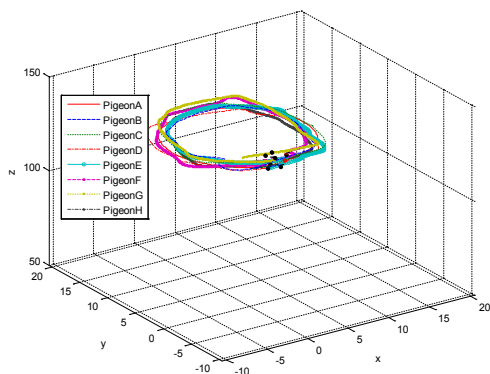


图4 第一组鸽群飞行仿真中的三维运动轨迹

图5给出第二组自由飞行仿真中鸽群的三维飞行轨迹(鸽子A、B、C、D、E、F、G、H进行集群飞行),图中红色圆点代表鸽子A的最终位置,黑色圆点代表鸽子B-H的最终位置,每只鸽子的飞行轨迹由不同线型的曲线表示。建立了改进MFNN(Modified Fixed Number of Neighbors)模型与MHLN(Modified Hierarchical Leadership Network)模型,并结合MFNN与MHLN模型进行鸽群层级网络设计,建立一种MFNN-MHLN混合模型。鸽子A为最高级领导者,其飞行方式为绕八字转弯,飞行轨迹为x-y平面内的八字型,鸽子B-H为跟随者,并且根据MFNN-MHLN模型组成层级引领一跟随网络。在自由飞行中鸽群从空中的随机初始状态跟随领导者最终达到集群飞行的稳定状态。

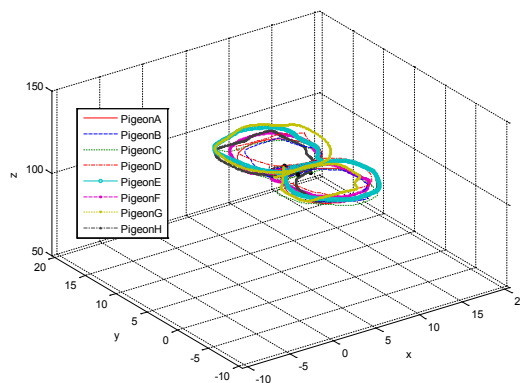


图5 第二组鸽群飞行仿真中的三维运动轨迹

随着仿真的进行鸽群从随机初始状态跟随领导者最终达到集群飞行的稳定状态。从自由飞行仿真中的鸽群速度曲线可以看出,仿真中鸽群在形成稳定飞行状态的过程中,由于层级网络的存在,飞行速度的变化呈现分层的先后一致性,引领者通过领导下层的跟随者,使跟随者的速度与领导者的速度产生一致。在形成稳定的集群飞行状态后,由于一些外部的环境影响,鸽群中的个体(如鸽子F)可能产生掉队的情况,此时掉队的鸽子可以通过观察上层领导者的行为重新加入鸽群。

仿鸽群无人机集群自主控制

无人机编队协同控制首先要求单无人机系统必须具有自主控制、规划与决策的能力,同时多无人机系统通过协同感知与内部、外部障碍规避形成稳定聚集及集群运动的控制。由于多机编队飞行中的转弯机动与实时避障协同控制方法有别于传统的协同编队飞行与队形跟踪方法,往往具有很强的动态性、机动性和实时性^[8]。传统的编队飞行与跟踪将飞行器动力学约束简化为对最小转弯半径或最大机动过载,但由于紧密飞行带来的编队间控制指令限制及集群内防撞的需求,传统的

施转向机动,根据转向机动决策建立的参考航向,通过航向控制器改变飞行状态以对准参考航向,最终飞过障碍物间隙。根据鸽子避障策略建立的无人机航向控制框架如图7所示。

为了验证障碍环境下基于鸽群智能的无人机协调控制算法的有效性,下面给出了不同场景设置下的仿真算例。无人机编队由若干架四旋翼无人机组成,数量 $N=8$,且各个无人机型号和性能参数相同。在仿真实验中应用鸽群智能行为使无人机形成稳定编队飞行,包括层级网络、速度一致、航向一致和航向协商等规则。

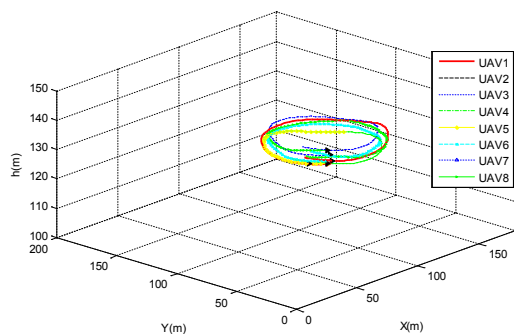


图8 盘旋飞行仿真中无人机的三维运动轨迹

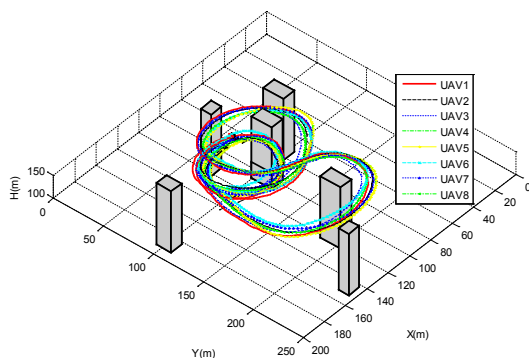


图9 障碍空间下飞行仿真中无人机的三维运动轨迹

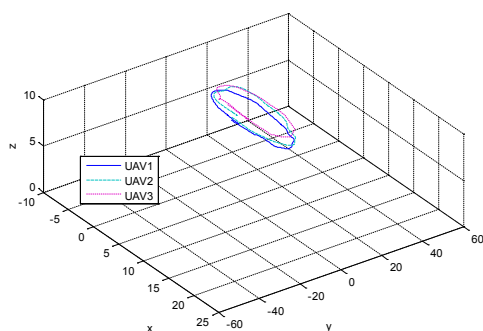
图8给出了盘旋飞行仿真中无人机的三维运动轨迹,图9给出了障碍空间下飞行仿真中无人

机编队的三维飞行轨迹,图中红线代表长机 UAV1 的飞行轨迹,每架无人机的飞行轨迹由不同线型的曲线表示,障碍物由灰色多面体表示。UAV1 为最高级领导者,其飞行方式为绕八字转弯,同时探测并躲避飞行途中的障碍物,飞行轨迹为 $x-y$ 平面内的八字型, UAV2-8 为跟随者。在飞行仿真中无人机编队从空中的随机初始状态跟随领导者最终达到编队飞行的稳定状态,对航向上出现的障碍也可以有效地进行躲避。在平稳的群集飞行中, MFNN 网络保证了引领者通过领导下层的跟随者,使跟随者的速度与领导者的速度产生一致,对比短距离的定常转弯飞行,无人机在长距离的飞行中速度误差更小。与定常转弯飞行不同的是,在绕八字转弯飞行中,由于 MHLN 网络的作用,无人机中的跟随者可以在领导者快速转弯机动的情况下进行紧密跟随,飞行速度的变化呈现分层的先后一致性,同时高度趋同算法保证编队在同一高度飞行。

基于鸽群行为的多无人机自主外场飞行验证的三维飞行轨迹如图10所示,图中显示的位置数据为相对坐标,无人机的相对坐标原点为第一个航路点,坐标为东经 116.3452887° , 北纬 39.9768621° , 飞行高度为 5m。



(a) $t=10s$

(b) $t=50s$ (c) $t=80s$ 

(d) 外场飞行实时轨迹

图 10 基于鸽群行为的无人机自主飞行验证

由图 10 结果可见, 基于鸽群行为机制的三架无人机外场飞行时能保持稳定的编队飞行, 自主

飞行性能良好, 无人机能够稳定在期望的邻居附近, 达到了预期的试验效果。

结论

本文围绕无人机集群自主控制的关键技术需求, 从对鸽群智能运动规则与模型的研究出发, 分析了鸽群运动的信息交互方式、不同运动模式、稳定性能等, 并选择合理的鸽群智能运动模型规则应用于解决无人机集群自主控制问题, 提高了无人机集群飞行的安全性, 且缩短了无人机到达目标点的时间, 通过飞行试验验证了所提出的无人机集群控制算法和改进避障导引算法的有效性。

下一步将研究如何进一步模拟鸽群智能行为, 同时进一步借鉴欧椋鸟、大雁等其他鸟群的行为机制, 进行面向实际作战想定的无人机集群自主控制技术验证。

参考文献

- [1] Vicsek T, Zafeiris A. Collective motion [J]. Physics Reports, 2012, 517(3-4): 71-140.
- [2] Nagy M, Ákos Z., Biro D, et al. Hierarchical group dynamics in pigeon flocks [J]. Nature, 2010, 464(7290): 890-893.
- [3] 邱华鑫, 段海滨. 从鸟群群集飞行到无人机自主集群编队[J]. 工程科学学报, 2017, 39(3): 317-322.
- [4] Magalhães P, White K G. A good time to leave?: the sunk time effect in pigeons [J]. Behavioural processes, 2014, 105: 1-5.
- [5] Flack A, Ákos Z., Nagy M, et al. Robustness of flight leadership relations in pigeons [J]. Animal Behaviour, 2013, 86(4): 723-732.

- [6] Chaté H , Ginelli F, Grégoire G. Modeling collective motion: variations on the Vicsek model [J]. The European Physical Journal B, 2008, 64(3-4): 451-456.
- [7] Virág C, Vásárhelyi G, Tarcai N, et al. Flocking algorithm for autonomous flying robots [J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2014, 9(2): 025012.
- [8] Mischiati M, Lin H T, Herold P, et al. Internal models direct dragonfly interception steering [J]. Nature, 2015, 517(7534): 333-338.
- [9] Usherwood J R, Stavrou M, Lowe J C, et al. Flying in a flock comes at a cost in pigeons [J]. Nature, 2011, 474(7352): 494-497.
- [10] Flack A, Pettit B, Freeman R, et al. What are leaders made of? The role of individual experience in determining leader-follower relations in homing pigeons [J]. Animal Behaviour, 2012, 83(3): 703-709.
- [11] 罗琪楠. 基于鸽群行为机制的多无人机协调围捕及验证[D]. 北京: 北京航空航天大学学位论文, 2017.
- [12] 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[J]. 中国科学:技术科学, 2015, 45(6): 559-572.
- [13] 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[J]. 控制理论与应用, 2015, 32(10): 1298-1304.
- [14] Prodan I, Olaru S, Bencatel R, et al. Receding horizon flight control for trajectory tracking of autonomous aerial vehicles [J]. Control Engineering Practice, 2013, 21(10): 1334-1349.