



# 仿鸽群被动式惯性应急避障的无人机集群飞行验证

申燕凯<sup>1</sup>, 段海滨<sup>1,2\*</sup>, 邓亦敏<sup>1</sup>, 罗琪楠<sup>1</sup>, 魏晨<sup>1</sup>

1. 北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院, 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

2. 鹏城实验室, 深圳 518000

\* 通信作者. E-mail: hbduan@buaa.edu.cn

收稿日期: 2018-12-21; 接受日期: 2019-03-28; 网络出版日期: 2019-10-17

国家自然科学基金 (批准号: 61425008, 91648205) 资助项目

**摘要** 本文研究了鸽群被动式惯性应急避障行为, 并将其应用于无人机集群协同飞行验证. 自然界中的鸽群在飞行过程中动态调整路线, 当遇到障碍物时, 产生一种应急行为, 即被动地调整自身当前方向, 朝着障碍物间的最大缝隙穿越障碍, 完成避障. 在进行飞行验证前, 对设计的无人机集群系统架构进行阐述. 然后, 通过设置地面静止障碍物应急避障和空中运动障碍物应急避障两种场景对鸽群避障行为进行验证, 并给出相应的无人机集群飞行时序图和飞行轨迹图.

**关键词** 鸽群智能, 应急避障, 无人机集群, 协同控制

## 1 引言

无人机 (unmanned aerial vehicle, UAV) 是一类具有自主飞行、规划决策等能力的无人驾驶飞行器. 无人机集群系统则是整合多类型、多功能无人机资源, 可执行对地、对海、对空三维立体化协同作战任务的复杂系统<sup>[1]</sup>. 在未来信息化、体系化的作战环境中, 相对于单无人机系统而言, 无人机集群系统通过合理高效地协同任务规划, 可同时完成情报、监视、侦察, 以及多目标攻击等多重任务, 充分发挥单机作战功效, 体现出集群资源的智能化作战优势, 极大提高了任务执行成功率和效率, 降低了风险和成本<sup>[2,3]</sup>. 无人机集群协同控制作为无人机集群系统研究、设计中的一个关键性问题, 是指多架具有自主能力的无人机在空间中形成特定的稳定队形, 同时又能够根据外部情况和任务需求实时进行队形动态调整, 实现无人机集群的协调一致性<sup>[4,5]</sup>. 虽然无人机集群可提高系统性能, 但也面临着诸如系统协调管理的难度大等问题. 如果缺乏科学、高效的控制策略, 无人机集群将难以发挥协同的优势, 无人机之间可能会在时间、空间, 以及任务层面上发生冲突, 存在碰撞的危险, 无法完成既定任务. 因此, 在复杂作战环境下, 实现无人机集群的高效控制、最大化发挥无人机自主性能具有极其重要的意义<sup>[6]</sup>.

**引用格式:** 申燕凯, 段海滨, 邓亦敏, 等. 仿鸽群被动式惯性应急避障的无人机集群飞行验证. 中国科学: 信息科学, 2019, 49: 1343–1352, doi: 10.1360/N112018-00333

Shen Y K, Duan H B, Deng Y M, et al. Verification of a UAV swarm flight simulating the passive inertial emergency obstacle avoidance behavior of a pigeon flock (in Chinese). Sci Sin Inform, 2019, 49: 1343–1352, doi: 10.1360/N112018-00333

生物群集行为作为生物环境适应性的一种表现, 在自然界中十分普遍. 人们通过分析鸟群<sup>[7]</sup>、蚁群<sup>[8]</sup>、鱼群<sup>[9]</sup>等生物群体的社会性行为, 提出了群体智能, 即, 通过个体间的信息交互完成有序的群集运动, 并且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. 近年来, 随着信息技术与智能技术的快速发展, 大量学者针对生物集群社会中广泛存在的群集运动、决策行为中的个体运动轨迹进行高精度的采集、重建和分析, 在一定程度上将生物群集运动的交互规则及决策方法加以推断或还原<sup>[10]</sup>. 如 Hauert 等<sup>[11]</sup> 添加了生物迁徙机制, 实现了基于 Reynolds 原则的固定翼无人机集群飞行控制. Vásárhelyi 等<sup>[12]</sup> 借鉴生物集群行为, 实现了旋翼无人机集群自主编队飞行. 2015 年 Saska<sup>[13]</sup> 实现了旋翼无人机沿预定轨迹集群运动.

研究表明, 鸟群与无人机集群无论在任务环境还是在任务需求上的较大相似性, 这使得鸟群群集行为的研究对于无人机集群自主协调控制具有很多借鉴意义. 鸽群作为一种常见的鸟类群体, 其特有的导航能力、群体飞行机制以及较强的学习能力, 使其成为很多研究学者的研究对象. 如: Vicsek 团队<sup>[14]</sup> 通过对鸽群分层领导行为的研究, 提出了一种鸽群中个体飞行速度相关度函数模型, 并建立了层次化的鸽群领导网络. Flack 团队<sup>[15]</sup> 通过对多组鸽群飞行数据的记录和分析, 研究鸽群群集决策机制. Lin 等<sup>[16]</sup> 通过分析鸽子穿越树木障碍时的飞行数据, 研究鸽子应对多个近距离障碍的飞行轨迹调整方法. Duan 等<sup>[17]</sup> 对鸽群启发式避障行为进行初步验证. 总之, 鸽群的集群行为体现出自组织、自协调等特点, 其中所蕴含的运动、决策、信息传递机制与无人机集群自主控制的需求相符. 因此, 研究基于鸽群群集行为的无人机集群协同控制, 具有很重要的战略意义<sup>[18]</sup>.

## 2 仿鸽群被动式惯性应急避障的无人机集群控制

面对信息不确定、不完全等复杂战场环境时, 如何保证无人机集群安全性是无人机领域研究的重要方向<sup>[19]</sup>. 其中, 集群感知与避障能力是提高无人机集群生存能力的必要条件. 首先, 无人机自身应具备局部环境感知能力. 其次, 通过构建集群通信网络, 实现集群内的无人机的状态共享, 既能够避免集群内部无人机之间发生碰撞, 也可以保证无人机集群躲避外部障碍, 同时还可以实现集群编队及队形重构<sup>[20,21]</sup>. 因此, 通过群体内部的协调控制和外部环境的交互, 可保证无人机集群飞行安全.

通过对鸽子穿越小空间、跨越近距离障碍物等短距离运动行为的长时间观察分析可知, 鸽子主要依赖视觉感知系统获取其与障碍物的相对位置信息, 并且在避障过程中并非提前获知障碍物信息, 而是采用被动式惯性应急避障策略进行航线调整, 其核心思想是鸽子在遇到障碍物时, 实时调整当前飞行方向, 朝着最大障碍物间隙飞行, 完成避障<sup>[16]</sup>. 因此, 可通过借鉴鸽群避障行为进行无人机集群控制. 无人机集群避障控制如图 1 所示, 包括: 检测障碍物、转向机动决策、实施转向机动、无人机航向控制、无人机状态更新. 其中, 无人机避障策略如图 2 所示.

(1) 检测障碍物. 鸽子的视觉感知范围有限, 形成扇形区域, 只能对视场范围内的物体进行感知和识别, 将其映射到无人机的视觉识别系统中, 可作出如下定义: 首先, 将无人机视为视场角限制和感知距离限制的鸽子. 其次, 鸽子可检测到位于有效感知区域内的障碍物. 因此, 将无人机的感知区域设置为顶点为  $(X_{eye}, Y_{eye})$ , 半径为  $R_{vis}$ , 相应的圆心角为  $2\theta_{vis}$  的扇形区域, 并且使扇形顶点到弧线中点的方向与无人机当前的飞行方向  $\psi_{fly}$  保持一致. 其中,  $\theta_{vis} \in [0, \pi]$ ,  $R_{vis} > 0$ . 最后, 鸽子在飞行过程中不断检测自身与障碍物之间的相对距离和夹角来判断是否检测到障碍物. 因此, 当无人机与障碍物  $i$  的距离满足  $R_{obs_i} \leq R_{vis}$ , 且障碍物  $i$  到无人机的连线与无人机航向间的夹角小于  $\theta_{vis}$  时, 则认为无人机检测到该障碍物.

(2) 转向机动决策. 鸽子在飞行过程中主要是通过通过分析自身与检测到的障碍物间的相对位置和缝

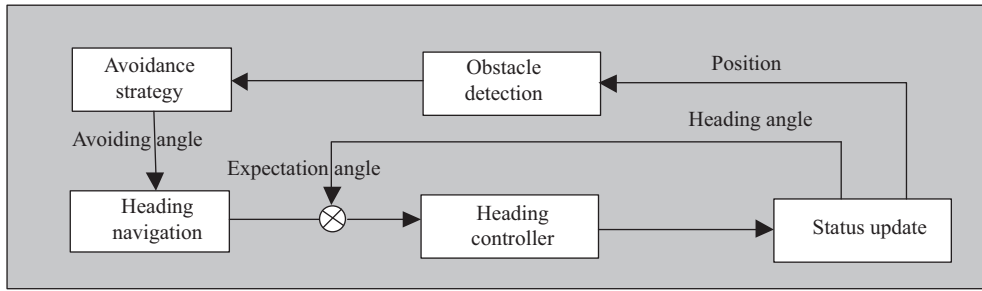


图 1 无人机避障控制

Figure 1 The control of the UAV obstacle avoidance

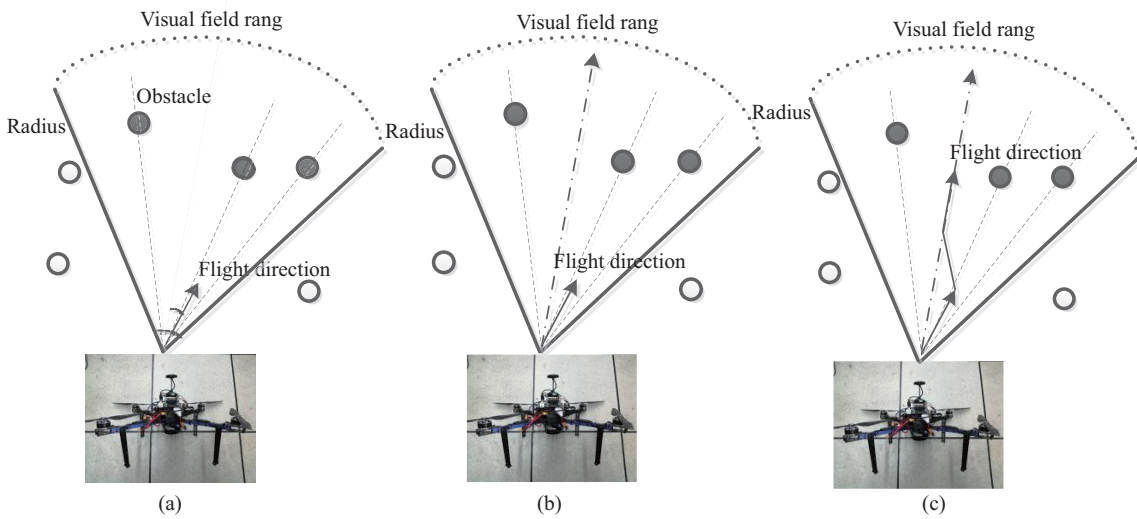


图 2 (网络版彩图) 无人机避障策略

Figure 2 (Color online) The avoidance strategy of the UAV. (a) Obstacle detection; (b) steering decision-making; (c) steering maneuvering.

隙大小进行转向的. 因此, 将其映射到无人机中可作出如下定义: 鸽子检测到的障碍物间的缝隙可看作由无人机与障碍物的距离  $R_{obs_i}$ 、无人机航向角  $\psi_{fly}$  以及无人机与障碍物的夹角  $\theta_{obs_i}$  间的差异所描述的物理量. 无人机将根据不同障碍物在空间中的位置信息和障碍物间的缝隙信息进行航向调整. 因此, 针对无人机视场范围内的障碍物  $i$ , 计算其期望避障角  $\alpha_{obs_i}$ :

$$\alpha_{obs_i} = (\psi_{fly} - \theta_{obs_i}) \frac{\theta_{vis}}{|\psi_{fly} - \theta_{obs_i}|} \frac{R_{vis}}{R_{obs_i}}. \quad (1)$$

(3) 实施转向机动. 鸽子在飞行过程中会实时调整自身当前飞行方向, 尤其在遇到障碍物后, 将对准最大障碍物间隙飞行, 从而完成避障动作. 因此, 当无人机没有检测到障碍物时, 将保持当前的飞行状态继续飞行; 当检测到障碍物后, 并且存在多个障碍物时, 综合考虑所有障碍物与无人机航向的夹角和无人机的期望避障角, 调整自身航向, 使其对准最大的障碍物间隙, 从而保证无人机安全飞行. 其中, 无人机期望航向角  $\theta_{exp}$  可描述为

$$\theta_{exp} = \sum_i^n (\theta_{obs_i} + \alpha_{obs_i}), \quad (2)$$

其中  $n$  表示障碍物的个数.

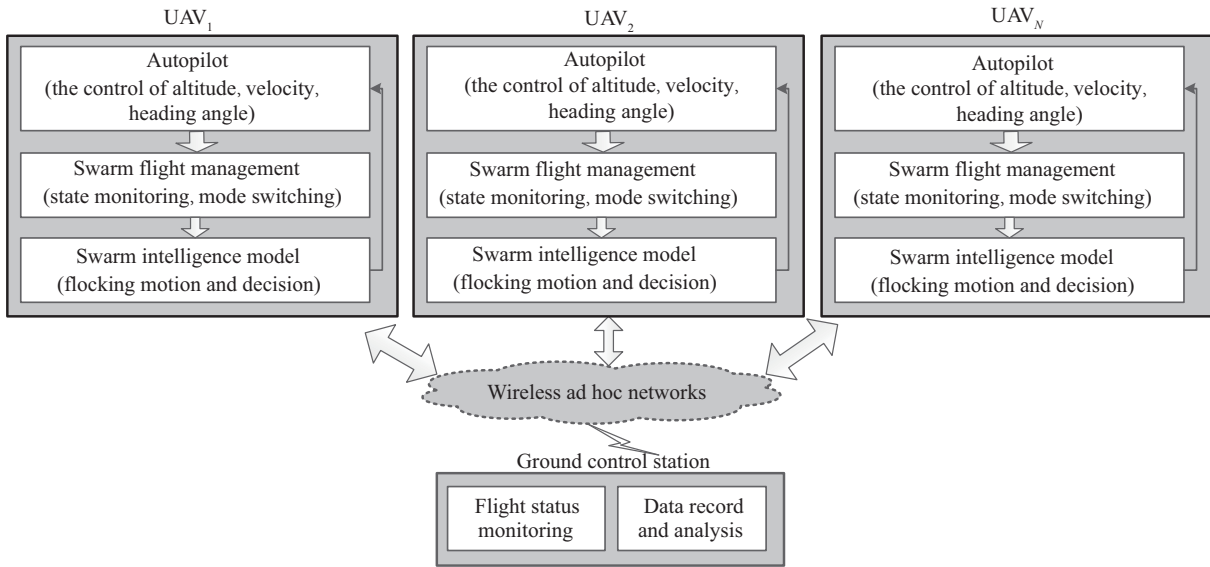


图 3 无人机集群系统架构  
Figure 3 The system structure of UAV swarm

(4) 无人机航向控制. 将无人机转向机动决策得到的期望航向角作为航向控制器的输入, 将调整后的航向作为控制器的输出, 对航向角误差进行控制. 考虑到无人机在实际飞行过程中, 航向调整过程较慢, 同时, 存在传感器等信息延迟和随机噪声, 因此, 无人机航向控制在比例 - 积分 - 微分控制律的基础上, 加入有时间延迟的航向角变化率, 同时添加惯性系数进行调节, 以增加控制的稳定性. 此时, 航向控制器的控制律可表示为

$$\dot{\psi}_{\text{fly}}(t) = K_P \cdot \theta_{\text{err}}(t - \tau) + K_I \int_0^t \theta_{\text{err}}(t - \tau) dt + K_D \cdot \dot{\theta}_{\text{err}}(t - \tau) + K_S \cdot \dot{\psi}_{\text{fly}}(t - \tau), \quad (3)$$

其中  $\tau$  为控制系统的视觉传感器探测造成的时间延迟,  $\theta_{\text{err}} = \psi_{\text{fly}} - \theta_{\text{exp}}$  为无人机当前飞行方向与期望飞行方向之间的误差,  $K_P$ ,  $K_I$  和  $K_D$  分别为无人机航向控制器的比例控制增益、积分控制增益和微分控制增益,  $K_S$  为惯性稳定控制增益.

(5) 无人机状态更新. 在航向控制器的作用下, 根据式 (3) 控制器的控制率更新航向角, 并将其带入式 (4) 更新无人机的空间位置. 如果所有的无人机已经形成了目标队形, 在整个飞行过程中遇到障碍物时, 由距离障碍物最近的无人机作出决定, 然后与其附近的无人机交换信息, 达成一致, 最后以相同的方向和角度共同避障.

$$\begin{cases} \dot{X}_{\text{eye}} = V \cos \theta_{\text{fly}}, \\ \dot{Y}_{\text{eye}} = V \sin \theta_{\text{fly}}, \end{cases} \quad (4)$$

其中  $V$  表示无人机的当前速度.

### 3 无人机集群系统设计

无人机集群系统设计是实现无人机集群飞行的前提, 因此, 本部分对该系统整体结构框架进行阐述. 如图 3 所示, 顶层为安装了 Linux 操作系统的单板计算机, 作为任务处理器, 安装机器人操作系

统 (robot operating system, ROS), 在 ROS 环境中进行多无人机协调算法和通信程序的编写. 底层为开源飞行控制器, 板上集成了微处理器、各种传感器和丰富的外设接口具有较高的可靠性和较强运算能力, 作为自动驾驶仪负责无人机的本体控制, 实现如自主起飞、着陆、悬停、跟踪航路点功能. 机载的各种传感器, 负责感知环境信息, 为无人机的控制系统提供反馈, 如三轴加速度计、微型陀螺仪、磁力计、全球定位系统 (global positioning system, GPS), 为无人机提供位置和姿态等信息. 无人机间通信系统由一套无线自组织网络 (wireless ad hoc network, WANET) 组成, 负责多无人机之间的状态、指令的发送和接收<sup>[22]</sup>. 此外, 地面站和数据通信系统负责无人机与地面工作人员之间、无人机之间的通信交流. 通过地面站, 操作人员可以实时监控无人机的当前位置、速度和飞行姿态, 可以在紧急情况下发出控制指令, 保证操作人员可以进行手动控制或在危急情况下实现迫降.

## 4 无人机集群飞行验证

### 4.1 地面静止障碍物应急避障

无人机集群地面静止障碍物应急避障的总体方案是: 首先, 对障碍物目标进行检测, 利用图像颜色分割技术, 提取目标轮廓. 其次, 对提取的轮廓进行圆拟合, 从而得到该圆的最小外接矩形, 用于位姿估计. 最后, 采用稳健  $n$  点透视 (a robust solution to the perspective-n-point problem, RPnP) 位姿估计方法求解方程组实现位姿估计, 进而得到障碍物相对无人机的位置信息. 综合考虑飞行安全和机载任务机的信息处理能力和处理速度, 其视觉检测以及位姿解算处理周期为 50 ms.

无人机搭载的摄像头作为视觉识别系统的输入, 将解算后获取的障碍物的相对位置信息, 通过通信协议发布给网络中的其他无人机, 实现信息共享. 假设无人机均位于局域网可通信的距离范围内. 在避障过程中, 首先判断无人机视觉识别系统是否发布障碍物信息. 若没有接收到障碍物信息, 则保持原有的飞行轨迹. 若接收到障碍物信息, 避障系统将解码后的障碍物的相对位置信息转化为惯性坐标系下的经纬度, 并存储在信息中. 获取障碍物相对位置后, 进行鸽群被动式惯性应急避障行为的后两步操作. 无人机根据检测到的障碍间隙来制定避障策略, 获取最终的航向角, 完成避障动作, 最终安全穿越障碍区域. 在飞行验证中, 障碍物选用红色球状标识物. 无人机预设的任务为从南至北穿越场地, 障碍物随机放置, 且与无人机集群的初始位置保留一定的距离. 初始阶段, 无人机集群距离障碍物较远, 障碍物处于无人机集群的视觉探测距离外. 如图 4(a) 和 (b) 所示, 当接收不到障碍物信息时, 无人机集群按照预定航线飞行. 在前进过程中, 当障碍物进入无人机视觉范围 (半径设为 5 m) 时, 如图 4(c) 和 (d) 所示, 无人机接收到障碍物的相对位置信息, 执行航向改变策略, 以 2 m/s 的速度避开障碍物 (如果飞行速度过快, 或者信息处理能力和速度不够的情况下, 可能检测不到障碍物, 造成与障碍物发生碰撞). 如图 4(e) 和 (f) 所示, 无人机集群避开障碍物, 此时, 根据障碍物上一时刻的惯性坐标系位置判断除障碍物位于无人机集群的后方, 避障完成, 读取飞控记录的数据得到图 4(g) 和 (h) 的飞行轨迹. 其中, 椭圆圈出的是无人机集群, 矩形框圈出的是障碍物.

### 4.2 空中运动障碍物应急避障

无人机集群空中运动障碍物应急避障的总体方案是: 首先, 使用无人机来模拟障碍物. 其次, 利用构建的局部通信网络发布障碍物的位置信息. 最后, 结合鸽群被动式惯性应急避障行为实施避障. 假设无人机均位于局域网可通信的距离范围内, 其预设的任务为从南至北穿越场地, 障碍物随机放置, 且与无人机集群的初始位置保留一定的距离. 障碍物可将 GPS 获取的位置信息通过通信协议发布给网络中的其他无人机. 在避障过程中, 集群中的无人机首先判断障碍物是否发布其位置信息, 若没有接收

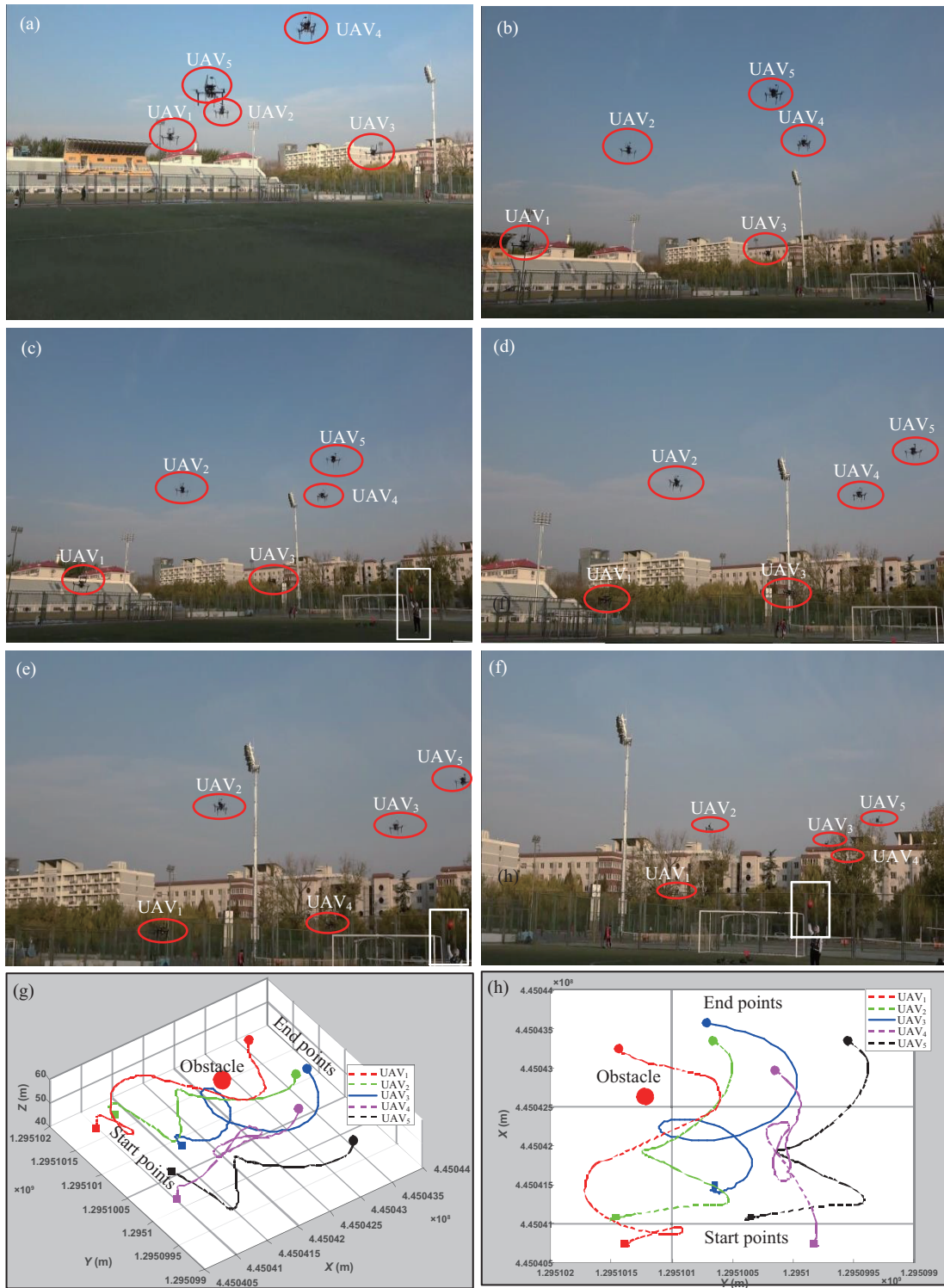


图 4 (网络版彩图) 地面静止障碍物应急避障

**Figure 4** (Color online) The static obstacle emergency avoidance on the ground. (a) and (b) show that UAVs cannot detect the obstacle. (c) and (d) show that UAVs can detect obstacle and adjust the current direction to avoid obstacle. (e) and (f) present that UAVs complete obstacle avoidance. (g) and (h) present the flight paths of UAVs obstacle avoidance in 3D and 2D.

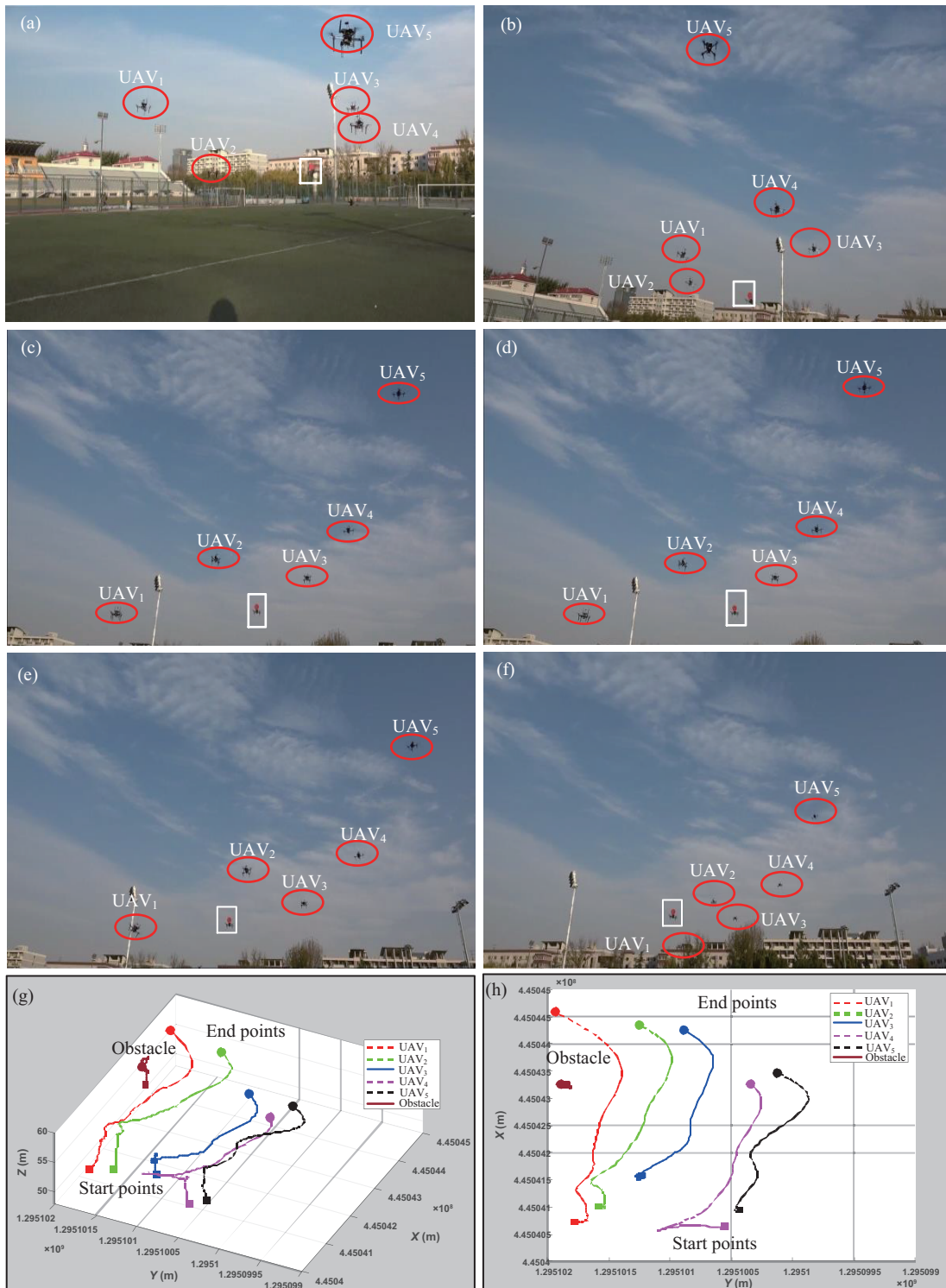


图 5 (网络版彩图) 空中运动障碍物应急避障

**Figure 5** (Color online) The moving obstacle emergency avoidance in the air. (a) and (b) show that UAVs cannot detect the obstacle. (c) and (d) show that UAVs can detect obstacle and adjust the current direction to avoid obstacle. (e) and (f) present that UAVs complete obstacle avoidance. (g) and (h) present the flight paths of UAVs obstacle avoidance in 3D and 2D.

到障碍物信息, 说明预定飞行轨迹中没有障碍物, 则保持原有的轨迹继续飞行. 若读取到障碍物信息, 避障系统将解码后的障碍物相对位置信息转化为惯性坐标系下的障碍物经纬度, 存储在信息中. 若障碍物与无人机集群的相对位置大于设定的避障距离时, 无人机集群依然保持原有航路继续飞行. 若障碍物与无人机集群的相对位置小与等于避障距离时, 集群中的无人机在感知到障碍物后采取转向机动决策和实施转向机动进行避障. 其中, 在转向机动决策中, 依然采用先检测障碍物的间隙, 再获取最终避障角度的步骤. 在实施转向机动中, 通过改变速度在不同维度的分量, 调整无人机对准目标航向飞行, 最终安全穿越障碍区域. 如图 5(a) 和 (b) 所示, 障碍物和集群无人机以不同时刻起飞, 此时, 障碍物并没有发布其位置信息到网络中. 因此, 无人机集群按预定航路飞行. 当障碍物起飞后, 在垂直方向 2 m 范围内运动, 并发布其位置信息到网络中, 其他无人机接收到该信息后, 判断是否采取避障策略, 如图 5(c) 和 (d) 所示. 当障碍物与其他无人机之间的距离小与等于安全距离 (设为 5 m) 时, 其他无人机采取避障策略进行避障, 如图 5(e) 和 (f) 所示. 通过读取飞行数据得到无人机的飞行轨迹, 如图 5(g) 和 (h) 所示. 其中, 椭圆圈出的是无人机集群, 矩形框圈出的是障碍物.

## 5 结论

鸽群作为一种拥有特殊导航能力、飞行机制及较强学习能力的生物群体, 其智能行为机制对于无人机集群系统的设计具有很强的借鉴意义. 本文对近年无人机集群系统领域和鸽群行为机制的相关研究进展进行了总结和概述. 研究了鸽群被动式惯性应急避障行为, 建立了该行为机制与无人机之间的映射关系. 通过设置两种场景对仿鸽群避障策略的无人机集群协同控制进行飞行验证, 结果表明该策略的有效性, 同时有助于无人机集群系统的优化设计.

## 参考文献

- 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: 97–101 [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: 97–101]
- Duan H B, Qiu H X. *Unmanned Vehicle Swarm Autonomous Control Based on Swarm Intelligence*. 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]
- Duan H B, Qiu H X, Chen L, et al. Prospects on unmanned aerial vehicle autonomous swarm technology. *Sci Tech Rev*, 2018, 36: 90–98 [段海滨, 邱华鑫, 陈琳, 等. 无人机自主集群技术研究展望. *科技导报*, 2018, 36: 90–98]
- Duan H B, Zhang D F, Fan Y M, et al. From wolf pack intelligence to UAV swarm cooperative decision-making. *Sci Sin Inform*, 2019, 49: 112–118 [段海滨, 张岱峰, 范彦铭, 等. 从狼群智能到无人机集群协同决策. *中国科学: 信息科学*, 2019, 49: 112–118]
- Liu C, Zhou Q, Hu X G. Consensus control of discrete-time heterogeneous multi-agent system. *Chin J Eng*, 2016, 38: 143–148 [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: 143–148]
- Duan H B, Li P. Autonomous control for unmanned aerial vehicle swarms based on biological collective behaviors. *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]
- Nagy M, Ákos Z, Biro D, et al. Hierarchical group dynamics in pigeon flocks. *Nature*, 2010, 464: 890–893
- Wang B, Lu M, James M, et al. Chemical camouflage: a key process in shaping an ant-treehopper and fig-fig wasp mutualistic network. *Sci Rep*, 2018, 8: 1833
- Wen C K C, Chen K S, Chen W C, et al. The influence of tourism-based provisioning on fish behavior and benthic composition. *Ambio*, 2018, 54: 1–11
- Hagstrum J T. A reinterpretation of “Homing pigeons’ flight over and under low stratus” based on atmospheric propagation modeling of infrasonic navigational cues. *J Comp Physiol A*, 2019, 205: 67–78
- Hauert S, Leven S, Varga M, et al. Reynolds flocking in reality with fixed-wing robots: communication range vs.



- maximum turning rate. In: Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, San Francisco, 2011. 5015–5020
- 12 Vászárhelyi G, Virágh C, Somorjai G, et al. Outdoor flocking and formation flight with autonomous aerial robots. In: Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Chicago, 2014. 3866–3873
  - 13 Saska T. MAV-swarms: unmanned aerial vehicles stabilized along a given path using onboard relative localization. In: Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Denver, 2015. 894–903
  - 14 Nagy M, Ákos Z, Biro D, et al. Hierarchical group dynamics in pigeon flocks. *Nature*, 2010, 464: 890–894
  - 15 Flack A, Ákos Z, Nagy M, et al. Robustness of flight leadership relations in pigeons. *Anim Behav*, 2013, 86: 723–732
  - 16 Lin H T, Ros I G, Biewener A A. Through the eyes of a bird: modelling visually guided obstacle flight. *J Royal Soc Interface*, 2014, 11: 20140239
  - 17 Huo M Z, Duan H B, Yang Q, et al. Live-fly experimentation for pigeon-inspired obstacle avoidance of quadrotor unmanned aerial vehicles. *Sci China Inf Sci*, 2019, 62: 052201
  - 18 Luo Q N. Research on cooperative control and pursuit-evasion strategy of multi-UAV based on pigeon behavioral mechanisms. Dissertation for Ph.D. Degree. Beijing: Beihang University, 2017 [罗琪楠. 基于鸽群行为机制的多无人机协调围捕及验证. 博士学位论文. 北京: 北京航空航天大学, 2017]
  - 19 Qiu H X, Duan H B. From collective flight in bird flocks to unmanned aerial vehicle autonomous swarm formation. *Chin J Eng*, 2017, 39: 317–322 [邱华鑫, 段海滨. 从鸟群群集飞行到无人机自主集群编队. *工程科学学报*, 2017, 39: 317–322]
  - 20 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: 128201
  - 21 Wang G Q, Luo H, Hu X X, et al. A survey on coordinated UAV formation management. *Electron Opt Control*, 2013, 20: 49–53 [王国强, 罗贺, 胡笑旋, 等. 无人机编队管理的研究综述. *电光与控制*, 2013, 20: 49–53]
  - 22 Duan H B, Yang Q, Deng Y M, et al. Unmanned aerial systems coordinate target allocation based on wolf behaviors. *Sci China Inf Sci*, 2019, 62: 014201

# Verification of a UAV swarm flight simulating the passive inertial emergency obstacle avoidance behavior of a pigeon flock

Yankai SHEN<sup>1</sup>, Haibin DUAN<sup>1,2\*</sup>, Yimin DENG<sup>1</sup>, Qinan LUO<sup>1</sup> & Chen WEI<sup>1</sup>

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

2. *Peng Cheng Laboratory, Shenzhen 518000, China*

\* Corresponding author. E-mail: hbduan@buaa.edu.cn

**Abstract** In this paper, the passive inertial emergency obstacle avoidance behavior of pigeons is studied and applied to the coordinated flight verification of an unmanned aerial vehicle (UAV) swarm. Pigeons in nature dynamically adjust their routes during flight. When they encounter obstacles, emergency behaviors are generated; i.e., they change the current direction passively, get cross obstacles toward the largest gap between obstacles, and thus complete obstacle avoidance. Prior to the flight verification, the design of the UAV swarm system architecture is explained. Further, two scenarios of static emergency obstacle avoidance on the ground and with moving obstacles in the air are set up. The corresponding timing sequence diagrams and flight path diagrams are also given.

**Keywords** pigeon flock intelligence, emergency avoidance, UAV swarm, cooperative control



**Yankai SHEN** was born in 1989. He received his B.S. degree in automation from the Hebei University of Science & Technology (HUST), Shijiazhuang, China in 2013, and M.S. degree in control theory and engineering from HUST, Shijiazhuang, China in 2016. He is currently pursuing his Ph.D. degree in guidance, navigation, and control of aerial vehicles in the School of Automation Science and Electrical Engineering at Beihang University. His current research interests include navigation, control and decision of unmanned aerial vehicles, bio-inspired computation, and artificial intelligence.



**Haibin DUAN** was born in 1976. He received his Ph.D. degree in control theory and control engineering from the Nanjing University of Aeronautics and Astronautics (NUAA) in 2005. Currently, he is a full professor in the School of Automation Science and Electrical Engineering at Beihang University. His current research interests include bio-inspired computing, biological computer vision, and multi-UAV autonomous formation control.



**Yimin DENG** was born in 1989. He received his B.S. and Ph.D. degrees from School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University in 2011 and 2017, respectively. He is currently an assistant professor in the School of Automation Science and Electrical Engineering at Beihang University. He is enrolled in Young Elite Scientists Sponsorship Program by Chinese Association for Science and Technology and Young Top Talent Support Program by Beihang University. His current research interests include biological computer vision and autonomous flight control.