基于自适应有限时间干扰观测器的无人机集群编队控制方法

董琦, 梁月乾, 赵彦杰*

中国电子科技集团公司电子科学研究院, 北京 100041

* E-mail: zhaoyj_dky@163.com

收稿日期: 2019-08-18; 接受日期: 2019-10-09; 网络版发表日期: 2020-04-03

国家自然科学基金(批准号: 61803353, U19B2029)、装备预研领域重点基金(编号: 61403110307)和中国博士后科学基金(编号: 2017M620858)资助项目

摘要 近年来,随着无人机技术的发展,其任务能力逐渐增强,成本优势逐步凸显,加之多无人机协同技术的不断进步,无人机集群受到科学界、工程界越来越多研究人员的关注,其应用领域也在不断拓展. 本文对无人机集群受未知干扰影响下的编队问题进行了研究. 首先,设计了基于自适应增益的有限时间干扰观测器,可在有限时间内对未知干扰进行精确估计. 然后,将集群中的无人机分为可获知期望编队的绝对位置和不可获知期望编队的绝对位置两种类型,并基于此,设计了一种具有统一形式的包含绝对位置误差、相对位置误差、绝对速度误差、相对速度误差、干扰估计值等的编队控制器,并给出了控制器收敛的充分条件. 最后,通过设计的4个数值仿真实验,对所提出方法的有效性进行了验证.

关键词 无人机集群, 编队控制, 干扰观测器, 有限时间控制

1 引言

随着导航技术、控制理论、传感器技术、图像处理技术、材料科学、微处理器技术等快速发展,无人机的应用已经渗透到军事、民用领域的方方面面. 受自身尺寸、燃料、机动性能、平台载荷能力、机载处理能力、容错性等条件的约束^[1,2],单架无人机在执行任务时常常会存在诸多局限,无法满足任务的高效性、鲁棒性、容错性等要求. 相比于单架无人机,协同多无人机在任务的高效性、低能耗性、鲁棒性、容错性、可扩展性等方面具有诸多优势^[3]. 因此,使用多

架无人机协同完成一项任务已经成为无人机技术发展的趋势,且拥有广阔的发展空间和应用前景.

多无人机协同的一个最新发展形式是将成百上千的无人机组成一个大规模无人机集群,执行侦察、打击等多种任务,这一形式将发展成为未来战争的一种颠覆性技术^[4]. 无人机集群技术的目的是能够根据不同需求形成功能可重构的、分布式的智能自主系统,其灵活性(自适应性、可扩展性、可维持性)、鲁棒性(可靠性、可存活性、容错性)等优势充分发挥必定会对科学、技术和社会的许多领域产生重大影响^[5]. 然而,在无人机集群真正应用之前,仍有诸多技术问题

引用格式: 董琦, 梁月乾, 赵彦杰. 基于自适应有限时间干扰观测器的无人机集群编队控制方法. 中国科学: 技术科学, 2020, 50: 423–438
Dong Q, Liang Y Q, Zhao Y J. UAV swarm formation control based on adaptive finite-time observer disturbance (in Chinese). Sci Sin Tech, 2020, 50: 423–438, doi: 10.1360/SST-2019-0290

需要解决^[5], 其中, 最为典型的一个便是集群的编队控制问题。

广义的集群编队控制可以分为两类, 编队控制和蜂拥控制^[6]。编队控制要求集群形成并保持某个预先设定的几何形状; 蜂拥控制可使集群通过自组织的方式形成一个不定形状的编队。与蜂拥控制可以通过一些简单自组织规则、自底向上、完全分布的方式^[6-10]实现不同, 编队控制的实现中或多或少会需要一些全局要素, 如全局通信拓扑图、全局编队形状描述等^[11]。在综述性文献^[11]中, 根据感知能力和交互能力的高低不同, 编队控制方法被分成基于位置(position)的方法、基于位移(displacement)的方法、基于距离(distance)的方法三种, 它们对无人机感知能力的要求越来越低, 而对机间交互能力的要求越来越高。

传统的编队控制方法主要有领航-跟随法、虚拟结构法、行为控制法、人工势场法等^[12]。领航-跟随法是目前最为成熟的编队控制方法^[13,14]。它的基本思想是将系统中的某个无人机作为领航者, 其余无人机作为跟随者, 在编队飞行过程中, 领航者无人机按照预先规划好的路径飞行, 而跟随者无人机通过一定的控制策略与领航者无人机之间保持一定的相对位置和方向飞行。方法的优点是简化了多无人机系统的控制复杂度, 层级明确, 扩展性好; 但领航者没有跟随者的信息反馈, 无法根据当前的编队状况调整飞行策略; 另外, 由于编队对领航者无人机的过分依赖, 当领航者控制失效或者发生故障时, 就会导致整个编队无法维持。虚拟结构法的主要思想是将多个无人机组成的队形看成一个刚性的虚拟结构, 每个无人机是该结构上的一个节点, 当编队移动时, 每个无人机跟踪刚体上对应的节点进行运动^[15,16]。方法的优点是思想简单, 无需为编队选择领航者, 且具有较高的编队控制精度; 但由于该方法是一种集中式的控制方法, 容错能力较差, 且需要无人机间进行大量通信。行为控制法首先为每个无人机设计一些基本行为模式, 包括避障、避撞、目标搜索和编队保持等, 然后根据每个无人机自身和环境的信息反馈, 以及由此计算出的各行模式模式的平均权重, 为它选择最合适的行为模式^[17,18]。该方法具有实时反馈特点, 是一种完全分布式的控制结构。它的优点是系统可扩展性好, 可以动态加入新的无人机; 易于实现编队中无人机间的彼此合作, 没有单点失败的情形。它的主要缺点是难以对系统进行数学描

述, 无法用数学语言分析其稳定性。人工势场法为整个空间定义一个势能场, 它一般分为目标势能场和障碍物势能场两部分^[19,20]。目标势能场对每个无人机施加吸引力, 而障碍物势能场对每个无人机施加排斥力。当合力为零时, 就形成了一个稳定的编队。势能场的负梯度方向为处于相应点处的无人机提供了一个参考飞行策略。该方法的优点是有完备的数学论证, 易于应用, 特别是在避障中。缺点是势能函数不容易确定, 势能场中的局部极小点会影响编队的全局收敛性。

近年来, 随着多智能体理论的兴起和发展, 基于多智能体一致性理论的编队控制方法受到越来越多的关注。与传统的编队控制方法相比, 基于多智能体一致性理论的编队控制方法仅需邻域内无人机的局部信息, 通过完全分布式的方法即可实现大规模无人机集群的编队控制, 而且集群技术要求的灵活性和鲁棒性等显著增强。

Ren^[21]根据二阶多智能体一致性的结果, 在不同的编队条件下, 为二阶多智能体系统设计了多个编队控制策略, 给出了编队控制收敛的条件, 并将其应用到一种小型旋翼无人机的编队控制实现上。Seo等人^[22]将一致性控制协议与输出反馈线性化方法结合, 为无人机设计了时变编队控制器, 还提出了一种故障诊断与隔离方法, 当判断出通信丢失或者某个无人机故障时, 可以将故障无人机及时隔离的同时, 保证其余无人机仍可以正常编队飞行。基于领航-跟随法, 并结合人工势场法的避撞功能, Kuriki和Namerikawa^[23]为旋翼无人机设计了一种基于一致性的可以同时实现编队和避撞的编队控制策略。Dong等人^[24]给出了无人机时变编队的充分必要条件, 并显式地给出无人机编队控制的设计算法。此外, 他们还将编队控制算法推广到切换拓扑的情形^[25]。Qi等人^[26]进一步将文献^[24,25]的结果推广到有向切换拓扑的情形。在连通无向图、无人机之间不交互速度信息等假设下, Sen等人^[27]为动目标的圆形编队跟踪设计了基于一致性的编队控制策略。Zhu等人^[28]为无人机编队设计了二阶一致性算法, 同时, 提出了一种同步技术, 以消除测量误差对编队的影响, 并利用一个六自由度模型对算法进行了仿真验证。当存在未知干扰时, Rojo-Rodriguez等人^[29]为旋翼无人机设计了基于一致性理论的鲁棒编队控制策略, 并在实验室环境中用Parrot AR.Drone旋翼无人机进行了实验验证。其他相关进展可参见综

述文献[11,30]及其参考文献。

本文针对存在未知干扰影响下固定翼无人机集群的编队控制问题进行研究. 主要的创新点如下:

(1) 设计了基于自适应增益的有限时间干扰观测器, 可在有限时间内实现对未知干扰的精准估计, 基于此, 提出了有限时间观测器-编队控制器综合策略;

(2) 设计了基于一致性理论的编队控制器, 该控制器中包含绝对位置误差、相对位置误差、绝对速度误差、相对速度误差和干扰估计值等, 可使无人机集群形成精确编队并保持队形飞行。

本文中, 用上标 T 表示矩阵的转置, 用 $\dot{x}(t)$ 表示变量 x 关于时间 t 的导数, 用 $\text{re}(\cdot)$ 表示一个复数的实部, 用 $\text{eig}_m(\cdot)$ 表示一个矩阵的第 m 个特征值, 用 $\text{diag}(\mathbf{a})$ 表示用向量 $\mathbf{a}$ 生成的一个对角矩阵, 用 $\mathbf{I}_m$ 表示一个 m 维单位矩阵, 用 $\mathbf{0}_m$ 表示一个 $m \times m$ 全零矩阵。

2 无人机集群的编队控制问题

2.1 无人机集群运动模型

设无人机集群由 N 个无人机组成. 对无人机 $i(i=1, 2, \dots, N)$, 设其运动模型可由如式(1)所示的带有惯性控制环节的三自由度质点运动学模型描述:

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = V_i(t)\cos(\gamma_i(t))\cos(\chi_i(t)), \\ \dot{y}_i(t) = V_i(t)\cos(\gamma_i(t))\sin(\chi_i(t)), \\ \dot{z}_i(t) = V_i(t)\sin(\gamma_i(t)), \\ \dot{V}_i(t) = (V_{ci}(t) - V_i(t)) / \tau_V, \\ \dot{\chi}_i(t) = (\chi_{ci}(t) - \chi_i(t)) / \tau_\chi, \\ \dot{\gamma}_i(t) = (\gamma_{ci}(t) - \gamma_i(t)) / \tau_\gamma, \end{cases} \quad (1)$$

其中, $\mathbf{p}_i(t) = (x_i(t), y_i(t), z_i(t))^T$ 为无人机 i 在 t 时刻的三维位置矢量, $V_i(t)$, $\chi_i(t)$, $\gamma_i(t)$ 分别为无人机 i 在 t 时刻的速度、航向角、爬升角大小, $V_{ci}(t)$, $\chi_{ci}(t)$, $\gamma_{ci}(t)$ 分别为速度、航向角、爬升角的控制输入值, τ_V , τ_χ , τ_γ 分别为速度、航向角、爬升角的时间常数, 无人机三自由度质心运动如图1所示。

可将运动学模型式(1)简化为如下二阶积分器模型:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{p}}_i(t) = \mathbf{v}_i(t), \\ \dot{\mathbf{v}}_i(t) = \mathbf{u}_i(t), \end{cases} \quad (2)$$

图1 (网络版彩图)无人机三自由度质心运动示意图
Figure 1 (Color online) 3-DOF kinematic model of the UAVs.

其中, $\mathbf{v}_i(t) = (v_{xi}(t), v_{yi}(t), v_{zi}(t))^T$ 为无人机 i 在 t 时刻的三维速度矢量, $\mathbf{u}_i(t) = (u_{xi}(t), u_{yi}(t), u_{zi}(t))^T$ 表示无人机 i 在3个轴向的加速度输入, 是无人机的虚拟控制输入矢量, 它与实际控制输入矢量之间的关系为

$$\begin{cases} V_{ci}(t) = \tau_V(u_{xi}(t)\cos(\gamma_i(t))\cos(\chi_i(t)) \\ \quad + u_{yi}(t)\cos(\gamma_i(t))\sin(\chi_i(t)) \\ \quad + u_{zi}(t)\sin(\gamma_i(t))) + V_i(t), \\ \chi_{ci}(t) = \tau_\chi(-u_{xi}(t)\sin(\chi_i(t)) \\ \quad + u_{yi}(t)\cos(\chi_i(t))) / (V_i(t)\cos(\gamma_i(t))) + \chi_i(t), \\ \gamma_{ci}(t) = \frac{\tau_\gamma}{V_i(t)}(-u_{xi}(t)\sin(\gamma_i(t))\cos(\chi_i(t)) \\ \quad - u_{yi}(t)\sin(\gamma_i(t))\sin(\chi_i(t)) \\ \quad + u_{zi}(t)\cos(\gamma_i(t))) + \gamma_i(t). \end{cases} \quad (3)$$

考虑无人机飞行过程中的风扰和执行器产生的不确定性, 将式(2)中的二阶积分器模型修改为如式(4)所示的带未知干扰的二阶积分器模型:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{p}}_i(t) = \mathbf{v}_i(t) + \mathbf{w}(t), \\ \dot{\mathbf{v}}_i(t) = \mathbf{u}_i(t) + \mathbf{v}_i(t), \end{cases} \quad (4)$$

其中, $\mathbf{w}(t)$ 为风扰的速度矢量, $\mathbf{v}_i(t)$ 为无人机 i 的执行器产生的未建模动态和不确定. 对上述两种扰动做如下合理性假设:

- (1) 它们都是一致有界的, 但上界是未知的;
 (2) 在短时间和一个小的飞行空间内, 可将风扰 $\mathbf{w}(t)$ 看作是一个慢变量, 表达成一个未知矢量参数;
 (3) $\mathbf{v}_i(t)$ 的时间变化率的大小 $\|\dot{\mathbf{v}}_i(t)\|$ 是有界的.
 对存在干扰的情形, 式(1)和(3)分别变为

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = V_i(t)\cos(\gamma_i(t))\cos(\chi_i(t)) + w_x(t), \\ \dot{y}_i(t) = V_i(t)\cos(\gamma_i(t))\sin(\chi_i(t)) + w_y(t), \\ \dot{z}_i(t) = V_i(t)\sin(\gamma_i(t)) + w_z(t), \\ \dot{V}_i(t) = (V_{ci}(t) - V_i(t)) / \tau_V, \\ \dot{\chi}_i(t) = (\chi_{ci}(t) - \chi_i(t)) / \tau_\chi, \\ \dot{\gamma}_i(t) = (\gamma_{ci}(t) - \gamma_i(t)) / \tau_\gamma, \end{cases} \quad (5)$$

和

$$\begin{cases} V_{ci}(t) = \tau_V((u_{xi}(t) + v_{xi}(t))\cos(\gamma_i(t))\cos(\chi_i(t)) \\ \quad + (u_{yi}(t) + v_{yi}(t))\cos(\gamma_i(t))\sin(\chi_i(t)) \\ \quad + (u_{zi}(t) + v_{zi}(t))\sin(\gamma_i(t))) + V_i(t), \\ \chi_{ci}(t) = \tau_\chi(-(u_{xi}(t) + v_{xi}(t))\sin(\chi_i(t)) + (u_{yi}(t) \\ \quad + v_{yi}(t))\cos(\chi_i(t)) / (V_i(t)\cos(\gamma_i(t))) + \chi_i(t), \\ \gamma_{ci}(t) = \frac{\tau_\gamma}{V_i(t)}(-(u_{xi}(t) + v_{xi}(t))\sin(\gamma_i(t))\cos(\chi_i(t)) \\ \quad - (u_{yi}(t) + v_{yi}(t))\sin(\gamma_i(t))\sin(\chi_i(t)) \\ \quad + (u_{zi}(t) + v_{zi}(t))\cos(\gamma_i(t))) + \gamma_i(t). \end{cases} \quad (6)$$

2.2 无人机集群机间通信问题

将集群无人机之间的通信拓扑建模成无向图 $\mathcal{G}(\mathcal{V}, \mathcal{E}, \mathbf{A})$, 其中 $\mathcal{V} = \{1, 2, \dots, N\}$ 为顶点集合(即所有无人机的集合), $\mathcal{E} \subseteq \mathcal{V} \times \mathcal{V}$ 为无向边的集合, $\mathbf{A} = [a_{ij}] \in \mathbb{R}^{N \times N}$ 为邻接矩阵. $a_{ij}=1$ 表示无人机 i 与无人机 j 之间有通信, 可通过通信交换各自位置、速度等信息, 此时无人机 i 与无人机 j 之间存在一条无向边, 即 $(i, j) \in \mathcal{E}$ 且 $a_{ij}=0$ 表示无人机 i 与无人机 j 之间无通信; 定义 $a_{ii}=0$, 表示无人机 i 与其自身无需通信. 若 $a_{ij}=1$, 则称无人机 j 为无人机 i 的邻居无人机. 无人机 i 的邻居无人机的集合记为 $\mathcal{N}_i = \{j \in \mathcal{V} : a_{ij} = 1\}$. 无向图 $\mathcal{G}(\mathcal{V}, \mathcal{E}, \mathbf{A})$ 的拉普拉斯矩阵定义为 $\mathbf{L} = [l_{ij}] \in \mathbb{R}^{N \times N} : l_{ii} = \sum_{j=1}^N a_{ij}$; 当 $i \neq j$ 时, $l_{ij} = -a_{ij}$.

2.3 无人机集群编队控制问题

无人机集群中的无人机可分为两类: 第一类是不仅可获知虚拟领航者绝对位置和绝对速度, 而且可获知与邻居无人机的期望相对位置和期望相对速度的无人机; 第二类是不存在虚拟领航者, 仅能获知与邻居无人机的期望相对位置和期望相对速度的无人机. 将无人机 i 的虚拟领航者的绝对位置和绝对速度分别记为 $\mathbf{p}_i^d(t)$ 和 $\mathbf{v}_i^d(t)$, 绝对速度的变化率记为 $\dot{\mathbf{v}}_i^d(t)$, 将无人机 i 相对于无人机 j 的期望相对位置和期望相对速度分别记为 $\mathbf{p}_{ij}^d(t)$ 和 $\mathbf{v}_{ij}^d(t)$. 设第一类无人机与第二类无人机的集合分别为 $\mathcal{V}_1$ 和 $\mathcal{V}_2$, 满足 $\mathcal{V}_1 \neq \emptyset$, $\mathcal{V}_1 \cap \mathcal{V}_2 = \emptyset$ 和 $\mathcal{V}_1 \cup \mathcal{V}_2 = \mathcal{V}$.

无人机集群的编队控制问题可描述如下. 为集群中的每个无人机设计控制律 $\mathbf{u}_i(t) = (V_{ci}(t), \chi_{ci}(t), \gamma_{ci}(t))^T$, 使得如下条件成立: (1) 对于第一类无人机, 即对任意的 $i \in \mathcal{V}_1$, 当 $t \rightarrow \infty$ 时, 有 $\mathbf{p}_i(t) \rightarrow \mathbf{p}_i^d(t)$, $\mathbf{v}_i(t) \rightarrow \mathbf{v}_i^d(t)$ 和 $\dot{\mathbf{v}}_i(t) \rightarrow \dot{\mathbf{v}}_i^d(t)$ 成立, 且对任意的 $j \in \mathcal{N}_i$, 均有 $\mathbf{p}_i(t) - \mathbf{p}_j(t) \rightarrow \mathbf{p}_{ij}^d(t)$ 和 $\mathbf{v}_i(t) - \mathbf{v}_j(t) \rightarrow \mathbf{v}_{ij}^d(t)$ 成立; (2) 对于第二类无人机, 即对任意的 $i \in \mathcal{V}_2$, 当 $t \rightarrow \infty$ 时, 对任意的 $j \in \mathcal{N}_i$, 均有 $\mathbf{p}_i(t) - \mathbf{p}_j(t) \rightarrow \mathbf{p}_{ij}^d(t)$ 和 $\mathbf{v}_i(t) - \mathbf{v}_j(t) \rightarrow \mathbf{v}_{ij}^d(t)$ 成立.

3 无人机集群的编队控制器设计

3.1 自适应有限时间干扰观测器设计

根据文献[31], 本节提出一种改进的有限时间干扰观测器设计形式, 对干扰 $\mathbf{w}(t)$ 和 $\mathbf{v}_i(t)$ 实现有限时间精确估计. 对无人机 $i(i=1, 2, \dots, N)$, 为其设计如下干扰观测器:

$$\begin{cases} \dot{\omega}_{i1}(t) = \mathbf{v}_i(t) + \Delta_{i1}(t), \\ \dot{\omega}_{i2}(t) = \mathbf{u}_i(t) + \Delta_{i2}(t), \end{cases} \quad (7)$$

其中, $\Delta_{i1}(t), \Delta_{i2}(t)$ 为干扰观测变量.

定义如下两个辅助滑模变量:

$$\boldsymbol{\sigma}_{il}(t) = \mathbf{x}_{il}(t) - \omega_{il}(t), \quad (8)$$

其中, $l=1, 2$, $\mathbf{x}_{i1}(t) = \mathbf{p}_i(t)$, $\mathbf{x}_{i2}(t) = \mathbf{v}_i(t)$. 对上式进行微分, 可得滑模变量动态方程为

$$\dot{\sigma}_{il}(t) = \dot{\mathbf{x}}_i(t) - \dot{\mathbf{w}}_{il}(t), \quad (9)$$

从而有

$$\begin{cases} \dot{\sigma}_{i1}(t) = \mathbf{w}(t) - \Lambda_{i1}(t), \\ \dot{\sigma}_{i2}(t) = \mathbf{v}_i(t) - \Lambda_{i2}(t). \end{cases} \quad (10)$$

基于超螺旋算法, 设计如式(11)所示的有限时间干扰观测变量, 可使得式(8)的滑模变量 $\sigma_{il}(t)$ 及其导数 $\dot{\sigma}_{il}(t)$ 在有限时间内收敛到零.

$$\begin{cases} \Lambda_{il}(t) = \alpha_{il} \frac{\sigma_{il}(t)}{\|\sigma_{il}(t)\|^{1/2}} + \zeta_{il}(t), \\ \dot{\zeta}_{il}(t) = \frac{\beta_{il}}{2} \frac{\sigma_{il}(t)}{\|\sigma_{il}(t)\|}, \end{cases} \quad (11)$$

其中, $\zeta_{il}(t)$ 为超螺旋滑模辅助变量. 式(11)中的增益 α_{il} 和 β_{il} 设计如下式所示的自适应形式:

$$\begin{cases} \dot{\alpha}_{il} = \begin{cases} \omega_{il} \sqrt{\frac{\gamma_{il}}{2}}, & \text{如果 } \|\sigma_{il}(t)\| > \sigma_{T,il}, \\ 0, & \text{否则,} \end{cases} \\ \beta_{il} = 2\varepsilon_{il}\alpha_{il}, \end{cases} \quad (12)$$

其中, ω_{il} , γ_{il} , ε_{il} 均为任意正常数, $\sigma_{T,il}$ 为误差阈值. $0 < \sigma_{T,il} < 1$, 值越大, 估计时间越短, 一般取 γ_{il} , ω_{il} 和 ε_{il} 为大于1的正值.

将式(11)代入式(9), 可得

$$\begin{cases} \dot{\sigma}_{il}(t) = -\alpha_{il} \frac{\sigma_{il}(t)}{\|\sigma_{il}(t)\|^{1/2}} + \zeta_{il}(t), \\ \dot{\zeta}_{il}(t) = -\frac{\beta_{il}}{2} \frac{\sigma_{il}(t)}{\|\sigma_{il}(t)\|} + \dot{\zeta}_{il}(t), \end{cases} \quad (13)$$

其中, $\xi_{i1}(t) = \mathbf{w}(t)$, $\xi_{i2}(t) = \mathbf{v}_i(t)$.

定理1 考虑非线性系统式(13), 自适应增益设计成式(12)的形式, 那么存在任意正常数 ω_{il} , γ_{il} , ε_{il} , 可得跟踪误差 $\sigma_{il}(t)$ 及其导数 $\dot{\sigma}_{il}(t)$ 在有限时间内收敛于0.

定理1的证明可参见文献[31].

当 $\sigma_{il}(t) = \dot{\sigma}_{il}(t) = 0$ 时, 即得出基于超螺旋算法的有界干扰观测变量 Λ_{il} 能在有限时间内对不确定项 $\mathbf{w}(t)$ 和 $\mathbf{v}_i(t)$ 进行精确估计.

3.2 编队控制器设计

将带未知干扰的二阶积分器模型式(4)的编队控制器设计为

$$\mathbf{u}_i(t) = \dot{\mathbf{v}}_i^d(t) - \mathbf{C}_{pi}\mathbf{e}_{pi}(t) - \mathbf{C}_{vi}\mathbf{e}_{vi}(t) - \Lambda_{i2}(t), \quad (14)$$

其中, $\mathbf{C}_{pi} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 和 $\mathbf{C}_{vi} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 均为正定对角矩阵, $\mathbf{e}_{pi}(t)$ 为编队位置误差, $\mathbf{e}_{vi}(t)$ 为编队速度误差, 它们分别计算如下:

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_{pi}(t) &= \lambda_{1pi}(\mathbf{p}_i(t) - \mathbf{p}_i^d(t)) \\ &+ \lambda_{2pi} \sum_{j=1}^N a_{ij}(\mathbf{p}_i(t) - \mathbf{p}_j(t) - \mathbf{p}_{ij}^d(t)), \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_{vi}(t) &= \lambda_{1vi}(\mathbf{v}_i(t) - \mathbf{v}_i^d(t)) \\ &+ \lambda_{2vi} \sum_{j=1}^N a_{ij}(\mathbf{v}_i(t) - \mathbf{v}_j(t) - \mathbf{v}_{ij}^d(t)) \\ &+ \lambda_{1pi}\Lambda_{i1} + \lambda_{2pi} \sum_{j=1}^N a_{ij}(\Lambda_{i1} - \Lambda_{j1}), \end{aligned} \quad (16)$$

其中, λ_{1pi} , λ_{2pi} , λ_{1vi} , λ_{2vi} 均为非负加权系数, 用于平衡误差中的绝对误差部分和相对误差部分. 对第二类无人机, 即对任意的 $i \in \mathcal{V}_2$, 有 $\lambda_{1pi} = \lambda_{1vi} = 0$.

定理2 考虑带未知干扰的二阶积分器模型式(4), 未知干扰满足前述假设, 将干扰观测器设计成式(7)的形式, 将编队控制器设计成式(14)的形式, 则当 $\lambda_{1pi} = \lambda_{1vi}$, $\lambda_{2pi} = \lambda_{2vi}$, $\mathbf{C}_{pi} = \mathbf{C}_p$, $\mathbf{C}_{vi} = \mathbf{C}_v$ 对所有 i 成立时, 若条件(17)满足, 则当 $t \rightarrow \infty$ 时, 由式(4)描述的集群系统可形成指定形状的编队. 式(17)的具体形式如下:

$$\operatorname{re}(\operatorname{eig}_m(\Gamma)) < 0, \quad m = 1, 2, \dots, 6N, \quad (17)$$

其中,

$$\Gamma = \mathbf{I}_N \otimes \begin{bmatrix} \mathbf{0}_3 & \mathbf{I}_3 \\ \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 \end{bmatrix} - (\Lambda_1 + \Lambda_2 \mathbf{L}) \otimes \begin{bmatrix} \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 \\ \mathbf{C}_p & \mathbf{C}_v \end{bmatrix}, \quad (18)$$

$$\Lambda_1 = \operatorname{diag}(\lambda_{1p1} \quad \lambda_{1p2} \quad \cdots \quad \lambda_{1pN}), \quad (19)$$

$$\Lambda_2 = \operatorname{diag}(\lambda_{2p1} \quad \lambda_{2p2} \quad \cdots \quad \lambda_{2pN}). \quad (20)$$

证明 当 $\lambda_{1vi} = \lambda_{1pi}$, $\lambda_{2vi} = \lambda_{2pi}$ 时, 对编队位置误差 $\mathbf{e}_{pi}(t)$ 和编队速度误差 $\mathbf{e}_{vi}(t)$ 关于时间 t 进行求导, 有

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{e}}_{pi}(t) &= \lambda_{1pi}(\dot{\mathbf{v}}_i(t) - \dot{\mathbf{v}}_i^d(t)) \\ &+ \lambda_{2pi} \sum_{j=1}^N a_{ij}(\dot{\mathbf{v}}_i(t) - \dot{\mathbf{v}}_j(t) - \dot{\mathbf{v}}_{ij}^d(t)) \\ &+ \lambda_{1pi}\Lambda_{i1} + \lambda_{2pi} \sum_{j=1}^N a_{ij}(\Lambda_{i1} - \Lambda_{j1}) \\ &= \mathbf{e}_{vi}(t), \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{e}}_{vi}(t) = & \lambda_{1pi}(\mathbf{u}_i(t) + \mathbf{\Lambda}_{i2}(t) - \dot{\mathbf{v}}_i^d(t)) \\ & + \lambda_{2pi} \sum_{j=1}^N a_{ij}(\mathbf{u}_i(t) + \mathbf{\Lambda}_{i2}(t) \\ & - \mathbf{u}_j(t) - \mathbf{\Lambda}_{j2}(t) - \dot{\mathbf{v}}_{ij}^d(t)) \\ & + \lambda_{1pi} \dot{\mathbf{\Lambda}}_{i1}(t) + \lambda_{2pi} \sum_{j=1}^N a_{ij}(\dot{\mathbf{\Lambda}}_{i1}(t) - \dot{\mathbf{\Lambda}}_{j1}(t)).\end{aligned}\quad (22)$$

由未知干扰的假设(2), 有 $\dot{\mathbf{\Lambda}}_{i1} = 0$, $\dot{\mathbf{\Lambda}}_{j1} = 0$, 于是

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{e}}_{vi}(t) = & \lambda_{1pi}(\mathbf{u}_i(t) + \mathbf{\Lambda}_{i2}(t) - \dot{\mathbf{v}}_i^d(t)) \\ & + \lambda_{2pi} \sum_{j=1}^N a_{ij}(\mathbf{u}_i(t) + \mathbf{\Lambda}_{i2}(t) \\ & - \mathbf{u}_j(t) - \mathbf{\Lambda}_{j2}(t) - \dot{\mathbf{v}}_{ij}^d(t)).\end{aligned}\quad (23)$$

再将式(14)代入, 可得

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{e}}_{vi}(t) = & -\lambda_{1pi}(\mathbf{C}_{pi}\mathbf{e}_{pi} + \mathbf{C}_{vi}\mathbf{e}_{vi}) \\ & -\lambda_{2pi} \sum_{j=1}^N a_{ij}(\dot{\mathbf{v}}_i^d(t) - \dot{\mathbf{v}}_j^d(t) - \dot{\mathbf{v}}_{ij}^d(t)) \\ & -\lambda_{2pi} \sum_{j=1}^N a_{ij}(\mathbf{C}_{pi}\mathbf{e}_{pi} + \mathbf{C}_{vi}\mathbf{e}_{vi} - \mathbf{e}_{pj} - \mathbf{C}_{vj}\mathbf{e}_{vj}) \\ = & -\lambda_{1pi}(\mathbf{C}_{pi}\mathbf{e}_{pi} + \mathbf{C}_{vi}\mathbf{e}_{vi}) \\ & -\lambda_{2pi} \sum_{j=1}^N a_{ij}(\mathbf{C}_{pi}\mathbf{e}_{pi} + \mathbf{C}_{vi}\mathbf{e}_{vi} - \mathbf{C}_{pj}\mathbf{e}_{pj} - \mathbf{C}_{vj}\mathbf{e}_{vj}),\end{aligned}\quad (24)$$

当 $\mathbf{C}_{pi} = \mathbf{C}_p$, $\mathbf{C}_{vi} = \mathbf{C}_v$ 时, 对矩阵进行合并、整理、化简, 可得闭环控制系统误差

$$\mathbf{e} = (\mathbf{e}_{p1}^T(t) \ \mathbf{e}_{v1}^T(t) \ \cdots \ \mathbf{e}_{pN}^T(t) \ \mathbf{e}_{vN}^T(t))^T$$

的动态g s方程的系数矩阵为

$$\begin{aligned}\mathbf{\Gamma} = & \begin{bmatrix} \mathbf{0}_3 & \mathbf{I}_3 & \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 & \cdots & \mathbf{0}_3 \\ -\lambda_{1p1}\mathbf{C}_{p1} - \lambda_{2p1} \sum_{j=1}^N a_{1j}\mathbf{C}_{p1} & -\lambda_{1p1}\mathbf{C}_{v1} - \lambda_{2p1} \sum_{j=1}^N a_{1j}\mathbf{C}_{v1} & \lambda_{2p1}a_{12}\mathbf{C}_{p2} & \lambda_{2p1}a_{12}\mathbf{C}_{v2} & \cdots & \lambda_{2p1}a_{1N}\mathbf{C}_{vN} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 & \cdots & \mathbf{0}_3 & \mathbf{I}_3 \\ \lambda_{2pN}a_{N1}\mathbf{C}_{p1} & \lambda_{2pN}a_{N1}\mathbf{C}_{v1} & \lambda_{2pN}a_{N2}\mathbf{C}_{p2} & \cdots & -\lambda_{1pN}\mathbf{C}_{pN} - \lambda_{2pN} \sum_{j=1}^N a_{Nj}\mathbf{C}_{pN} & -\lambda_{1pN}\mathbf{C}_{vN} - \lambda_{2pN} \sum_{j=1}^N a_{Nj}\mathbf{C}_{vN} \end{bmatrix} \\ = & \begin{bmatrix} \mathbf{0}_3 & \mathbf{I}_3 & \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 & \cdots & \mathbf{0}_3 \\ -\lambda_{1p1}\mathbf{C}_p & -\lambda_{1p1}\mathbf{C}_v & \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 & \cdots & \mathbf{0}_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 & \cdots & \mathbf{0}_3 & \mathbf{I}_3 \\ \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 & \cdots & -\lambda_{1pN}\mathbf{C}_p & -\lambda_{1pN}\mathbf{C}_v \end{bmatrix} \\ + & \begin{bmatrix} \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 & \cdots & \mathbf{0}_3 \\ -\lambda_{2p1}\mathbf{C}_p \sum_{j=1}^N a_{1j} & -\lambda_{2p1}\mathbf{C}_v \sum_{j=1}^N a_{1j} & \lambda_{2p1}a_{12}\mathbf{C}_p & \lambda_{2p1}a_{12}\mathbf{C}_v & \cdots & \lambda_{2p1}a_{1N}\mathbf{C}_v \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 & \cdots & \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 \\ \lambda_{2pN}a_{N1}\mathbf{C}_p & \lambda_{2pN}a_{N1}\mathbf{C}_v & \lambda_{2pN}a_{N2}\mathbf{C}_p & \cdots & -\lambda_{2pN}\mathbf{C}_p \sum_{j=1}^N a_{Nj} & -\lambda_{2pN}\mathbf{C}_v \sum_{j=1}^N a_{Nj} \end{bmatrix} \\ \triangleq & \mathbf{\Gamma}_1 + \mathbf{\Gamma}_2,\end{aligned}\quad (25)$$

其中,

$$\mathbf{\Gamma}_1 = \mathbf{I}_N \otimes \begin{bmatrix} \mathbf{0}_3 & \mathbf{I}_3 \\ \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \lambda_{1p1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \lambda_{1p1} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \lambda_{1pN} \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 \\ \mathbf{C}_p & \mathbf{C}_v \end{bmatrix} \triangleq \mathbf{I}_N \otimes \begin{bmatrix} \mathbf{0}_3 & \mathbf{I}_3 \\ \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 \end{bmatrix} - \mathbf{\Lambda}_1 \otimes \begin{bmatrix} \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 \\ \mathbf{C}_p & \mathbf{C}_v \end{bmatrix},\quad (26)$$

$$\Gamma_2 = - \begin{bmatrix} \lambda_{2p1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \lambda_{2p1} & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & \lambda_{2pN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^N a_{1j} & -a_{12} & \cdots & -a_{1N} \\ -a_{21} & \sum_{j=1}^N a_{2j} & \cdots & -a_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -a_{N1} & -a_{N2} & \cdots & \sum_{j=1}^N a_{Nj} \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 \\ \mathbf{C}_p & \mathbf{C}_v \end{bmatrix} \triangleq -(\Lambda_2 \mathbf{L}) \otimes \begin{bmatrix} \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 \\ \mathbf{C}_p & \mathbf{C}_v \end{bmatrix}. \quad (27)$$

于是误差 $\mathbf{e} = (\mathbf{e}_{p1}^T(t) \ \mathbf{e}_{v1}^T(t) \ \cdots \ \mathbf{e}_{pN}^T(t) \ \mathbf{e}_{vN}^T(t))^T$ 的动态方程为

$$\dot{\mathbf{e}} = \Gamma \mathbf{e}, \quad (28)$$

其中, 系数矩阵 Γ 的形式如式(18)所示. 根据现代控制理论知识^[32], 可以得到如下结论, 若条件(17)满足, 当 $t \rightarrow \infty$ 时, 由式(4)描述的无人机集群系统可形成指定队形的飞行编队.

证毕.

注释 由于控制器式(14)中包含对执行器扰动 $\mathbf{v}_i(t)$ 的时变估计值 $\Delta_{i2}(t)$, 且它能在有限时间内实现对扰动的精确估计, 所以上述定理对时不变和时变的执行器扰动 $\mathbf{v}_i(t)$ 都是适用的.

4 仿真分析

本节对所提方法进行仿真实验. 若非特殊说明, 仿真参数取为表1中所示的值. 仿真中, $\Delta_{i1}(t)$ 和 $\Delta_{i2}(t)$ 等变量的初始估计值均取为随机值. 另外, 为消除由于离散化等带来的控制器振荡, 受文献[33]中有界控制器的启发, 当 $t > 80$ s 时, 采用如式(29)所示的控制器:

$$\mathbf{u}_i(t) = \dot{\mathbf{v}}_i^d(t) - \tanh(\mathbf{C}_{pi} \mathbf{e}_{pi}) - \tanh(\mathbf{C}_{vi} \mathbf{e}_{vi}) - \Delta_{i2}(t). \quad (29)$$

为满足无人机的实际运动学限制, 在实际仿真中, 对控制器进行了饱和和调整.

在第一个仿真实验中, 采用模型(1), 即假设无人机集群在编队过程中没有外界干扰 ($\mathbf{w}(t) = \mathbf{0}$, $\mathbf{v}_i(t) = \mathbf{0}$). 设无人机集群由4个无人机组成, 机间通信拓扑如图2所示, 是一个最小持续结构的拓扑网络. 期望编队是一个横队, 无人机2的虚拟领航者的初始位置为 $(0, 0, 100)^T$ 、速度为 $(21.21, 21.21, 0)^T$. 相邻无人机之间的期望距离为 50 m.

无人机的初始位置是在一定范围内随机选取的,

其平面 XY 坐标在以 $(0, 0)$ 为心、以 300 m 为半径的圆内随机选取, Z 坐标在区间 $[50, 300]$ m 内随机选取; 无人机的初始速度也是在一定范围内随机选取的, 速度大小在区间 $[20, 40]$ m/s 内随机选取, 航向角在区间 $[0^\circ, 360^\circ]$ 内随机选取, 爬升角在区间 $[-20^\circ, 20^\circ]$ 内随机选取. 后续仿真实验中, 无人机集群的初始位置和速度采取同样的选取方法.

第1个仿真实验的仿真结果如图3~6所示. 图3给出

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

参数	取值
τ_V	2
τ_x	0.8
τ_y	0.8
$\mathbf{w}(t)$	$(3, 5, 0.5)^T$
$\sigma_{T,i1}$	0.1
$\sigma_{T,i2}$	0.01
ω_{il}	1
γ_{il}	1
ε_{il}	1
$\mathcal{V}_1$	$\{1, 2\}$
$\mathcal{V}_2$	$\{3, 4, \dots, N\}$
$\lambda_{1pi}, i \in \mathcal{V}_1$	1
$\lambda_{1pi}, i \in \mathcal{V}_2$	0
$\lambda_{2pi}, i \in \mathcal{V}_1$	0
$\lambda_{2pi}, i \in \mathcal{V}_2$	1
$\lambda_{1vi}, i \in \mathcal{V}_1$	1
$\lambda_{1vi}, i \in \mathcal{V}_2$	0
$\lambda_{2vi}, i \in \mathcal{V}_1$	0
$\lambda_{2vi}, i \in \mathcal{V}_2$	1
$\mathbf{C}_{pi}$	$\mathbf{I}_3$
$\mathbf{C}_{vi}$	$\mathbf{I}_3$

图2 仿真1, 2, 3的通信拓扑图

Figure 2 Communication topology of Scenarios 1, 2 & 3.

了所有无人机的飞行轨迹, 以及它们在仿真初始时刻、33 s、66 s、仿真终止时刻的位置. 图3(b)的子图

给出了100 s时无人机集群的编队情况. 可以看到, 4个无人机通过相互间的协同机制(式(14)), 由最初的随机状态(0 s)逐渐收敛到期望的横队队形编队状态(66和100 s). 图4和5分别给出了各无人机的速度、加速度、航向角、爬升角随时间的变化情况. 从这两个图可以看到, 各无人机的速度、加速度、航向角、爬升角的值最终收敛到期望的值, 分别为30 m/s, 0 m/s^2 , 45° , 0° . 还可以看到, 在切换成振荡消除控制器(式(29))之前(80 s之前), 航向角和爬升角会存在一定程度的上下波动. 此外, 由于对控制器进行了饱和调整, 各无人机的速度、加速度、爬升角的值均满足无人机的运动学限制. 图6中展示了各无人机的速度、航向角、爬升角

图3 (网络版彩图)仿真1的编队过程图. (a) 斜视图; (b) 俯视图

Figure 3 (Color online) The formation process of Scenario 1. (a) Side view; (b) top view.

图 4 (网络版彩图)仿真1的速度与加速度变化曲线

Figure 4 (Color online) The evolution of the linear velocity and the acceleration of Scenario 1.

图 5 (网络版彩图)仿真1的航向角与爬升角变化曲线

Figure 5 (Color online) The evolution of the heading angle and the climb angle of Scenario 1.

的控制输入值随时间的变化情况. 可以看到, 80 s以后, 控制输入值趋于平稳, 稳定到期望值, 分别为30 m/s, 45° , 0° .

在第2个仿真实验中, 采用模型(5), 即无人机集群在编队过程中存在外界干扰, 并设 $\mathbf{w}(t)=(3, 5, 0.5)^T$, $\mathbf{v}_i(t)=(0.05, 0.09, -0.09)^T$. 设无人机集群由4个无人机

组成, 机间通信拓扑仍如图2所示. 期望编队是一个“人”字型, 无人机2(“人”字型编队最前面的无人机)的虚拟领航者的初始位置为 $(0, 0, 100)^T$ 、速度为 $(21.21, 21.21, 0)^T$. 相邻无人机之间的期望距离为50 m.

仿真2编队过程的斜视图和俯视图如图7所示, 可以看到, 在66 s时, 无人机集群已经具备了“人”字型编

图 6 (网络版彩图)仿真1的控制输入变化曲线
Figure 6 (Color online) The evolution of the control commands of Scenario 1.

图 7 (网络版彩图)仿真2的编队过程图. (a) 斜视图; (b) 俯视图
Figure 7 (Color online) The formation process of Scenario 2. (a) Side view; (b) top view.

队的雏形. 图8给出了各无人机的速度和加速度随时间的变化情况, 图9给出了各无人机的航向角和爬升角随时间的变化情况. 从这两个图可以看到, 各无人机的速度、加速度、航向角、爬升角的值最终收敛到期望的值. 除了加速度同样收敛到0外, 不同于仿真1, 由于风扰的存在, 速度、航向角、爬升角的期望值分别变为 24.389 m/s , 41.675° , -1.1747° . 正因如此, 将图7(b)的子图和图3(b)的子图进行比较, 可以看到, 当不存在风

扰时, 各无人机的飞行方向(机头方向)与飞行轨迹方向重合(图3(b)); 当存在风扰时, 各无人机的飞行方向与飞行轨迹方向有一个偏差角(图7(b)), 该偏差角是由风扰引起的, 此时, 各无人机的飞行速度与风扰速度的合速度的方向与飞行轨迹方向重合. 与仿真1相同的是, 各无人机的速度、加速度、爬升角的值也都满足无人机的运动学限制. 图10中展示了各无人机的速度、航向角、爬升角的控制输入值随时间的变化情况

图 8 (网络版彩图) 仿真2的速度与加速度变化曲线

Figure 8 (Color online) The evolution of the linear velocity and the acceleration of Scenario 2.

图 9 (网络版彩图) 仿真2的航向角与爬升角变化曲线

Figure 9 (Color online) The evolution of the heading angle and the climb angle of Scenario 2.

图 10 (网络版彩图)仿真2的控制输入变化曲线

Figure 10 (Color online) The evolution of the control commands of Scenario 2.

况. 可以看到, 80 s以后, 控制输入值趋于平稳, 并稳定到各自的期望值, 即24.389 m/s, 41.675°, -1.1747°. 图11给出了干扰观测误差(即式(8)中的两个辅助滑模变量)随时间变化的情况, 可以看到, 对所有无人机 i , 干扰观测误差在较短的时间内即可收敛到0. 到100 s时, 最大的干扰观测误差只有 10^{-13} . 但在初始阶段, 由于观测误差比较大, 是真实值的几十倍甚至几百倍, 各无人机速度和爬升角的控制输入值偏离了它们的运动学限制范围(图10).

第3个仿真实验与第二个基本相同, 只是将“人”字型编队的期望速度设为可变的. 具体地, 令期望速度的

大小保持不变, 速度方向按 $\pi/4\cos(\pi t/40)$ 变化. 通信拓扑也保持不变. 该仿真实验编队过程的斜视图和俯视图分别如图12(a)和(b)所示. 可以看到, 所有无人机的飞行轨迹都变成了正弦曲线, 这也正是虚拟领航者轨迹的形式.

在第4个仿真实验中, 用一个由24架无人机组成的无人机集群编成一个如图13所示飞翼机的形状. 机间通信拓扑类似于前3个仿真, 也是一个最小持续结构的拓扑网络, 即24个无人机通过首尾相接的方式进行通信, 每个无人机的入度和出度均为1, 共有24条通信链路, 所有链路组成一个回路. 令相邻无人机之间的期

图 11 (网络版彩图)仿真2的干扰观测误差变化曲线

Figure 11 (Color online) The evolution of the disturbance-observation errors of Scenario 2.

图 12 (网络版彩图) 仿真三的编队过程图. (a) 斜视图; (b) 俯视图

Figure 12 (Color online) The formation process of Scenario 2. (a) Side view; (b) top view.

图 13 飞翼机示意图

Figure 13 The sketch of a flying-wing aircraft.

望距离为 10 m, 其余条件同第 3 个仿真实验.

无人机集群不同时间段的飞行轨迹分别在图 14(a)~(d) 中给出. 集群在 75 s 时的编队队形在图 14(e) 中给出, 从中可以看到, 在 75 s 时, 无人机集群已经基本形成一个飞翼机的形状. 此后, 无人机集群将

在保持该飞翼机形状的同时, 跟随虚拟领航者做正弦曲线运动.

5 总结

本文立足群体智能应用, 对未知干扰影响下无人机集群的编队控制问题进行了研究, 提出了基于自适应有限时间干扰观测器的编队控制方法. 首先, 针对干扰未知的问题, 设计了基于自适应增益的有限时间干扰观测器, 可实现对有界但上界未知的干扰在有限时间内的精确估计. 其次, 对包含两类无人机的无人机集群, 设计了一个具有统一形式的包含绝对位置误

图 14 (网络版彩图) 仿真4的编队过程图. (a) $t=0\sim 25$ s; (b) $t=25\sim 50$ s; (c) $t=50\sim 75$ s; (d) $t=75\sim 100$ s; (e) $t=75$ s
 Figure 14 (Color online) The formation process of Scenario 4. (a) $t=0\sim 25$ s; (b) $t=25\sim 50$ s; (c) $t=50\sim 75$ s; (d) $t=75\sim 100$ s; (e) $t=75$ s.

差、相对位置误差、绝对速度误差、相对速度误差等的编队控制器, 并将自适应有限时间干扰观测器的输

出引入编队控制器中以快速抵消未知干扰的影响. 最后, 通过4个仿真实验验证了所提出方法的有效性.

参考文献

- 1 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]
- 2 Liang X L, Zhang J Q, Lü N. UAV Swarms (in Chinese). Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2018 [梁晓龙, 张佳强, 吕娜. 无人机集群. 西安: 西北工业大学出版社, 2018]
- 3 Xue R, Song J, Cai G. Distributed formation flight control of multi-UAV system with nonuniform time-delays and jointly connected topologies. *P I Mech Eng G-J Aersosp Eng*, 2016, 230: 1871–1881
- 4 Otto R P. Small Unmanned Aircraft Systems (SUAS) Flight Plan: 2016–2036. Bridging the Gap Between Tactical and Strategic. Technical Report. Washington DC: Air Force Deputy Chief of Staff, 2016
- 5 Chung S J, Paranjape A A, Dames P, et al. A survey on aerial swarm robotics. *IEEE Trans Robot*, 2018, 34: 837–855
- 6 Oh H, Ramezan Shirazi A, Sun C, et al. Bio-inspired self-organising multi-robot pattern formation: A review. *Robot Autonom Syst*, 2017, 91: 83–100
- 7 Reynolds C W. Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model. *SIGGRAPH Comput Graph*, 1987, 21: 25–34
- 8 Olfati-Saber R. Flocking for multi-agent dynamic systems: Algorithms and theory. *IEEE Trans Automat Contr*, 2006, 51: 401–420

- 9 Belkadi A, Liu Z, Ciarletta L, et al. Flocking control of a fleet of unmanned aerial vehicles. *Control Theor Technol*, 2018, 16: 82–92
- 10 Sun D, Kwon C, Hwang I. Hybrid flocking control algorithm for fixed-wing aircraft. *J Guid Control Dyn*, 2019, 42: 2443–2455
- 11 Oh K K, Park M C, Ahn H S. A survey of multi-agent formation control. *Automatica*, 2015, 53: 424–440
- 12 Zhang Y, Mehrjerdi H. A survey on multiple unmanned vehicles formation control and coordination: Normal and fault situations. In: Proceedings of the 2013 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). Atlanta, 2013. 1087–1096
- 13 Desai J P, Ostrowski J P, Kumar V. Modeling and control of formations of nonholonomic mobile robots. *IEEE Trans Robot Automat*, 2001, 17: 905–908
- 14 Yoon S, Park S, Kim Y. Guidance law for standoff tracking of a moving target with leader-follower unmanned aerial vehicles. In: Proceedings of AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit. Minneapolis, 2012. AIAA 2012-4824
- 15 Tan K-H, Lewis M A. Virtual structures for high-precision cooperative mobile robotic control. In: Proceedings of the 1996 IEEE/RSJ International Conference Intelligent Robots and Systems. Osaka, 1996. 132–139
- 16 Beard R W, Lawton J, Hadaegh F Y. A coordination architecture for spacecraft formation control. *IEEE Trans Contr Syst Technol*, 2001, 9: 777–790
- 17 Balch T, Arkin R C. Behavior-based formation control for multirobot teams. *IEEE Trans Robot Automat*, 1998, 14: 926–939
- 18 Monteiro S, Bicho E. Attractor dynamics approach to formation control: Theory and application. *Auton Robot*, 2010, 29: 331–355
- 19 Balch T, Hybinette M. Social potentials for scalable multi-robot formations. In: Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation. San Francisco, 2000. 73–80
- 20 Bennet D J, MacInnes C R, Suzuki M, et al. Autonomous three-dimensional formation flight for a swarm of unmanned aerial vehicles. *J Guid Control Dyn*, 2011, 34: 1899–1908
- 21 Ren W. Consensus strategies for cooperative control of vehicle formations. *IET Control Theor Appl*, 2007, 1: 505–512
- 22 Seo J, Kim Y, Kim S, et al. Consensus-based reconfigurable controller design for unmanned aerial vehicle formation flight. *P I Mech Eng G-J Aeronaut Eng*, 2012, 226: 817–829
- 23 Kuriki Y, Namerikawa T. Consensus-based cooperative formation control with collision avoidance for a multi-UAV system. In: Proceedings of the 2014 American Control Conference. Portland, 2014. 2077–2082
- 24 Dong X, Yu B, Shi Z, et al. Time-varying formation control for unmanned aerial vehicles: Theories and applications. *IEEE Trans Contr Syst Technol*, 2015, 23: 340–348
- 25 Dong X, Zhou Y, Ren Z, et al. Time-varying formation control for unmanned aerial vehicles with switching interaction topologies. *Control Eng Practice*, 2016, 46: 26–36
- 26 Qi Y, Zhou S, Kang Y, et al. Formation control for unmanned aerial vehicles with directed and switching topologies. *Int J Aerospace Eng*, 2016, 2016: 7657452
- 27 Sen A, Sahoo S R, Kothari M. Cooperative target-centric formation control without relative velocity measurements under heterogeneous networks. *J Intell Robot Syst*, 2017, 87: 683–698
- 28 Zhu X, Zhang X X, Yan M D, et al. Three-dimensional multiple unmanned aerial vehicles formation control strategy based on second-order consensus. *P I Mech Eng G-J Aeronaut Eng*, 2018, 232: 481–491
- 29 Rojo-Rodriguez E G, Garcia O, Ollervides E J, et al. Robust consensus-based formation flight for multiple quadrotors. *J Intell Robot Syst*, 2019, 93: 213–226
- 30 Zhu B, Xie L, Han D, et al. A survey on recent progress in control of swarm systems. *Sci China Inf Sci*, 2017, 60: 070201
- 31 Dong Q Z, Zong Q, Tian B, et al. Adaptive disturbance observer-based finite-time continuous fault-tolerant control for reentry RLV. *Int J Robust Nonlinear Control*, 2017, 27: 4275–4295
- 32 Zheng D Z. Linear System Theory (in Chinese). 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2002 [郑大钟. 线性系统理论. 第2版. 北京: 清华大学出版社, 2002]
- 33 Ren W. On consensus algorithms for double-integrator dynamics. *IEEE Trans Automat Contr*, 2008, 53: 1503–1509

UAV swarm formation control based on adaptive finite-time observer disturbance

DONG Qi, LIANG YueQian & ZHAO YanJie

China Academy of Electronics and Information Technology, Beijing 100041, China

Unmanned aerial vehicles (UAVs) have undergone rapid development over the past few decades, and their mission capabilities and low-cost advantages have become increasingly promising. Moreover, as the multi-UAV coordination technology advances, scientists and engineers are paying growing attention to the small UAV swarm, and its application scope is continually expanding. In this paper, the formation control problem of UAV swarms in the presence of unknown disturbances is addressed. Firstly, to reliably estimate its unknown disturbances, a finite-time disturbance observer is designed based on adaptive gains. Secondly, the swarm UAVs were split into two groups, one group was able to achieve the desired absolute positions of the desired formation while the other was unable. Based on this, for each UAV, a formation controller with a unified form consisting of absolute position error, relative position error, absolute velocity error, relative velocity error, and estimation of unknown disturbances is proposed, and a suitable condition is found for the controller. Finally, to validate the efficacy of the proposed method, four simulation experiments are performed.

UAV swarms, formation control, disturbance observer, finite-time control

doi: [10.1360/SST-2019-0290](https://doi.org/10.1360/SST-2019-0290)