

DOI:10.3969/j.issn.1674-3644.2019.02.0012

基于一致性的无人机编队飞行几何构型控制

易文, 雷斌

(1. 武汉科技大学机械自动化学院, 湖北 武汉, 430081; 2. 武汉科技大学机器人与智能系统研究院, 湖北 武汉, 430081)

摘要: 本文研究群体无人机系统编队飞行中的几何构型控制问题。采用一阶运动学模型进行系统描述, 用有向图来表示其通信网络结构, 将领导者-跟随者控制结构和一致性跟踪理论相结合, 提出了一种协同控制算法, 在不需每架无人机都能接收到领导者状态信息的情况下, 使无人机在编队飞行过程中改变几何构型的同时还可以相应改变行进方向。最后通过仿真验证了该控制算法的有效性。

关键词: 无人机; 编队飞行; 几何构型; 一致性; 协同控制

中图分类号: V279; TP273 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-3644(2019)02-0150-05

无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)编队飞行控制就是要使多架无人机组成的团队在向特定目标或方向运动的过程中, 相互之间保持预定的几何形态(即队形), 同时又要适应环境约束(例如避开障碍)。随着各种无人机或机器人在军事和民用领域发挥越来越重要的作用, 编队控制问题也吸引了研究人员的广泛关注。文献[1]分析了无人机编队飞行特点, 将编队飞行过程归结为编队集结、编队保持和编队重组三个阶段, 并分别对这三个阶段的研究现状进行了总结。文献[2-3]研究了基于领导者-跟随者的编队飞行控制方法, 其中, 某台 UAV 被指定为领导者, 而其他 UAV 被指定为跟随者。领导者跟踪预定轨迹, 而跟随者使用从领导者接收到的信息跟踪领导者, 但是上述研究对于领导者和部分跟随者之间无法通信的问题没有深入探讨。文献[4]采用基于行为的编队控制方法来保持 UAV 飞行过程中的几何队形。文献[5]将基于领导者-跟随者与基于行为的控制方法相结合, 提出一种混合式多机器人编队方法。文献[6]提出了软控制方法, 通过一个外加智能体进行系统干预, 使群集运动向预期方向进行。文献[7-8]均研究了基于无线传感器网络的“虚形体”技术, 通过虚拟实体诱导并协助群体机器人行为的演化。

群体无人机可视为多智能体系统。多智能体系统的一致性主要研究如何基于个体之间有

限的信息交换而设计出协议(算法), 使得所有智能体的某一状态量或是所有状态量收敛为一致。目前, 关于多智能体系统一致性问题的理论体系逐渐形成^[9-13], 群体一致性协同控制算法也已应用于无人机编队控制中^[14-15]。

在采用基于一致性的协同控制方法时, 常用有向图来描述无人机之间的信息交换关系, 将无人机简化为质点, 忽略单台无人机运动的方向性, 而把控制重点放在群体无人机的协同目标上, 但这在群体无人机系统的实际控制中会带来一些问题。本文主要研究群体无人机编队飞行中的几何构型控制问题, 将一致性跟踪理论和领导者-跟随者方法相结合, 采用一个虚拟领导者为无人机系统提供基准状态信息, 提出一种一致性协同控制算法, 在不需每架无人机都能接收到领导者状态信息的情况下, 使无人机在编队飞行过程中改变几何构型的同时还可以相应改变行进方向。

1 群体无人机系统描述

1.1 运动学模型

假设有 n 台无人机具有相同的运动特性, 而且每台无人机均具有方向性。考虑在二维平面运动的无人机质点模型:

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_i \\ \dot{y}_i \\ \dot{\theta}_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_i^x \\ v_i^y \\ \omega_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta_i & 0 \\ \sin\theta_i & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_i \\ \omega_i \end{pmatrix}, i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

收稿日期: 2018-10-09

基金项目: 湖北省教育厅科学研究计划重点项目(D20171101)。

作者简介: 易文(1993-), 男, 武汉科技大学硕士生。E-mail: 1139738315@qq.com

通讯作者: 雷斌(1979-), 男, 武汉科技大学副教授, 博士。E-mail: leibin@wust.edu.cn

式中: (x_i, y_i) 为无人机 i 的位置坐标; θ_i 为无人机 i 的方位角; 速度 v_i 和角速 ω_i 为无人机 i 的控制输入量。

设 $\mathbf{r}_i = (x_i, y_i)$, $\mathbf{u}_i = (u_{xi}, u_{yi})$, 对系统运动学模型进行反馈线性化可以得到一阶系统模型:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_i \\ \dot{y}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{xi} \\ u_{yi} \end{bmatrix} \quad (2)$$

\mathbf{u}_i 为无人机的虚拟控制输入, 它与实际控制输入量的关系为:

$$\begin{cases} v_i = \sqrt{u_{xi}^2 + u_{yi}^2} \\ \omega_i = \frac{u_{xi}\dot{u}_{yi} - u_{yi}\dot{u}_{xi}}{u_{xi}^2 + u_{yi}^2} \end{cases} \quad (3)$$

1.2 信息交互模型

为了描述由多台无人机组成的通信网络, 基于图论原理, 采用图 $G = \{v_n, \epsilon_n\}$ 来模拟无人机之间的信息交互关系。 $v_n = \{1, 2, \dots, n\}$ 为有限非空节点集, 表示群体无人机的集合; $\epsilon_n \subseteq v_n \times v_n$ 为边集, 表示群体无人机信息交互关系的集合; 边 $(i, j) \in \epsilon_n$ 表示存在从第 i 台无人机到第 j 台无人机的通信路径, 即第 j 台无人机可以从第 i 台无人机获得信息。

设 $\mathbf{A} \in \mathbf{R}^{n \times n}$, $\mathbf{D} \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 和 $\mathbf{L} \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 分别是与图 G 相关的邻接矩阵、度矩阵和拉普拉斯矩阵。邻接矩阵 $\mathbf{A} = [a_{ij}]$ 由下式给出:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, (j, i) \in \epsilon_n \\ 0, \text{其余} \end{cases} \quad (4)$$

这意味着如果第 i 台无人机可通过网络从第 j 台无人机获得信息, 则 $a_{ij} = 1$, 否则 $a_{ij} = 0$ 。

度矩阵 $\mathbf{D} = [d_{ij}]$ 是一个主对角矩阵, 且其对角元素 $d_{ii} = -\sum_{j=1}^n a_{ij}$ 非正。拉普拉斯矩阵 $\mathbf{L} = [l_{ij}]$ 定义为 $\mathbf{L} = \mathbf{D} - \mathbf{A}$, 并且满足以下条件:

$$\begin{cases} l_{ij} \leq 0, i \neq j \\ \sum_{j=1}^n l_{ij} = 0, i = 1, \dots, n \end{cases} \quad (5)$$

对于无向图, 矩阵 \mathbf{L} 具有对称正半定性, 但有向图的矩阵 \mathbf{L} 没有这个属性。

本文考虑加入一个参考状态后的群体无人机系统, 将编号为 $1, 2, \dots, n$ 的无人机视为跟随者, 编号为 $n+1$ 的参考状态视为领导者, 其可以是虚拟的数字信号, 也可以是一台无人机。该 $n+1$ 台无人机的信息交互图用 $G_{n+1} = \{v_{n+1}, \epsilon_{n+1}\}$ 表示。每台无人机都可以接收领导者的信息, 但领导者不受跟随者的影响, 即 $a_{(n+1)j} = 0$ 且 $a_{i(n+1)} = 1$ (其中 $i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n+1$)。该群体无人机系统的邻接矩阵、度矩阵和拉普拉斯矩阵分别

用 \mathbf{A}_{n+1} , \mathbf{D}_{n+1} 和 \mathbf{L}_{n+1} 表示, 定义同上。

2 编队控制算法设计

2.1 基本思路

以 3 台无人机和 1 个领导者构成的编队系统为例, 如图 1 所示, 3 台无人机 (编号为 1、2、3) 构成等腰三角形, 编队领导者位于底边的中点, 并沿着期望路径运动 (假设路径规划已经完成), 其运动轨迹表示为 $\mathbf{r}^d(t) = (x^d(t), y^d(t))$ 。

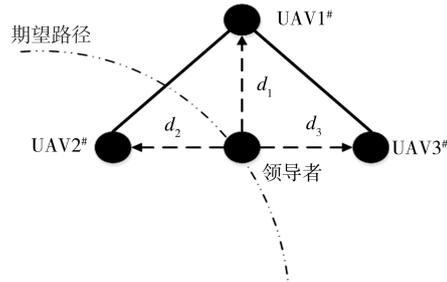


图 1 无人机编队构型

Fig. 1 Formation configuration of the UAVs

在编队飞行过程中, 每台无人机和领导者要保持一定的相对距离, 并且要和领导者的运动方向保持一定的方位角, 即每台无人机都会根据运动方向而相应改变和领导者的相对位置。

领导者的运动方向可以用单位速度矢量 $\dot{\mathbf{r}}^d(t) / |\dot{\mathbf{r}}^d(t)|$ 表示, 无人机 i 和领导者期望保持的相对位置用 \mathbf{d}_i 表示:

$$\mathbf{d}_i = \frac{|\mathbf{d}_i|}{|\dot{\mathbf{r}}^d(t)|} \mathbf{R}(\theta_i) \dot{\mathbf{r}}^d(t) \quad (6)$$

式中: $\mathbf{R}(\theta_i) = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \end{bmatrix}$ 为二维旋转矩阵, 其中 θ_i 是无人机 i 从领导者的运动方向起始沿逆时针方向的方位角, 如图 2 所示。

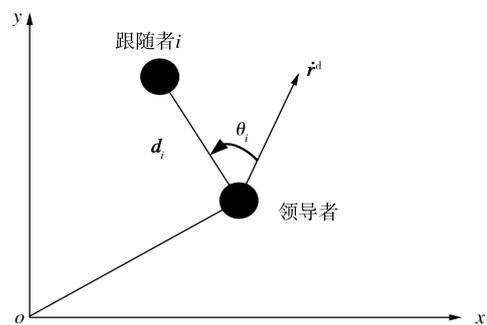


图 2 无人机的位置定义

Fig. 2 Position definition of the UAVs

2.2 一致性编队控制律设计

对于一阶群体无人机系统:

$$\dot{\mathbf{r}}_i(t) = \mathbf{u}_i(t), i = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

为了实现控制目标, 本文采用一致性跟踪算法使每台无人机的信息状态收敛于领导者的期望状

态,同时采用领导者-跟随者结构,使领导者为每个跟随者提供编队几何构型的目标位置。

给出群体无人机编队控制协议如下:

$$u_i = \dot{d}_i + \frac{1}{\eta_i} \sum_{j=1}^n a_{ij} \{ \dot{r}_j - \dot{d}_j - \gamma[(r_i - r_j) - (d_i - d_j)] \} + \frac{1}{\eta_i} a_{i(n+1)} [\dot{r}^d - \gamma(r_i - d_i - r^d)] \quad (8)$$

式中: γ 为正常数; $\eta_i = \sum_{j=1}^{n+1} a_{ij}$; $(d_i - d_j)$ 表示无人机期望保持的间距。

通过该协议可以计算出每台无人机每一时刻的控制输入,使群体无人机和期望位置都保持一个期望间距。

定理 1 假设 A_{n+1} 时不变,采用式(8)所示算法,当 $t \rightarrow \infty$ 时, $r_i \rightarrow r^d + d_i$ 且 $r_i - r_j \rightarrow d_i - d_j$, 当且仅当有向图 G_{n+1} 含有一棵有向生成树。

证明:首先给出以下引理。

引理 1^[11] 假设 $z = [z_1, \dots, z_p]^T (z_i \in \mathbf{R}^m)$ 并且拉普拉斯矩阵 $L_p \in \mathbf{R}^{p \times p}$ 满足式(5),那么以下 5 个条件是等价的:① L_p 有一个特征向量为 $\mathbf{1}_p$ 的简单零特征值,而其他特征值都有正实部;② 由 $(L_p \otimes I_m)z = 0$, 可得 $z_1 = \dots = z_p$;③ 系统 $\dot{z} = -(L_p \otimes I_m)z$ 渐进达到一致性;④ 与 L_p 对应的有向图含有一棵有向生成树;⑤ L_p 的秩为 $p - 1$ 。

定义 $\hat{r}_i = r_i - d_i, \hat{u}_i = u_i - \dot{d}_i$ 。已知 $\dot{r}_j = u_j, r_{n+1} = r^d, d_{n+1} = 0$, 因此 $\hat{r}_{n+1} = r_{n+1} - d_{n+1} = r^d$, 可将式(8)改写为:

$$\dot{\hat{r}}_i = \frac{1}{\sum_{j=1}^{n+1} a_{ij}} \sum_{j=1}^{n+1} a_{ij} [\dot{\hat{r}}_j - \gamma(\hat{r}_i - \hat{r}_j)], \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

经过变形,得到

$$\sum_{j=1}^{n+1} a_{ij} (\dot{\hat{r}}_i - \dot{\hat{r}}_j) = -\gamma \sum_{j=1}^{n+1} a_{ij} [(\hat{r}_i - \hat{r}_j)], \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

将式(10)看作一阶微分方程进行求解,可知当 $t \rightarrow \infty$ 时,

$$\sum_{j=1}^{n+1} a_{ij} [(\hat{r}_i - \hat{r}_j)] \rightarrow 0, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

注意,式(11)中包含有 n 个等式但是有 $n + 1$ 个变量。由于矩阵 L_{n+1} 的最后一行元素均为 0, 因此可以将 $a_{(n+1)j} = 0$ 加入到等式(11)中,然后将其改写为矩阵形式: $(L_{n+1} \otimes I_m) \hat{r} \rightarrow 0$, 其中 $L_{n+1} = [L_{n \times (n+1)}, \mathbf{0}_{1 \times (n+1)}]^T$ 。显然 L_{n+1} 满足 $p = n + 1$ 时引理 1 中的条件,并且已知与 L_{n+1} 对应的有向

图 G_{n+1} 含有一棵有向生成树,因此 L_{n+1} 和 \hat{r} 相当于引理 1 中的 L_p 和 z , 由引理 1 中条件②和③可得: $\hat{r}_i \rightarrow \hat{r}_j, \forall i, j \in \{1, 2, \dots, n + 1\}$ 当且仅当有向图 G_{n+1} 具有一棵有向生成树,由于 $\hat{r}_{n+1} = r^d$, 所以上述等价于 $r_i \rightarrow r^d + d_i$ 。证毕。

3 仿真分析

3.1 仿真设置

考虑由 3 台无人机和 1 个领导者构成的群体无人机系统,系统的网络拓扑结构如图 3 所示,图中箭头表示信息传递方向。由图 3 可见,只有第 1 台无人机可以从领导者处接受信息。

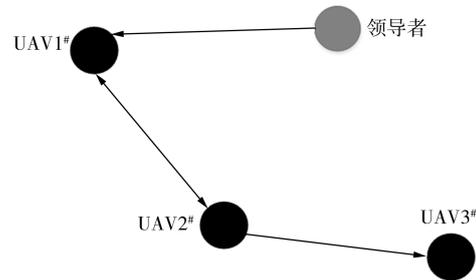


图 3 无人机系统网络拓扑结构

Fig. 3 Network topology of the UAVs

仿真过程中指定领导者的运动路径:领导者在圆形轨道上飞行,其半径为 5 m,周期为 30 s, 初始位置坐标为 (5, 0), 即领导者的运动轨迹 $r^d = (x^d, y^d)$ 可以用以下运动方程表示:

$$\begin{cases} x^d = 5 \cos(\pi t / 15) \\ y^d = 5 \sin(\pi t / 15) \end{cases} \quad (12)$$

考虑两种情形下的群体无人机编队控制:

案例 1:参照文献[14],用无人机与期望路径(即领导者路径)的固定相对位置偏差描述队形。假设 3 台无人机的相对位置偏差分别为 $d_1 = [0, 1], d_2 = [-1, 0], d_3 = [1, 0]$, 这将使无人机保持等腰三角形编队。

案例 2:将无人机的相对位置偏差 d_i 按本文式(6)来表示。每台无人机和领导者期望保持的间距 $|d_i|$ 和方位角 θ_i 如下:

表 1 无人机的期望间距和方位角

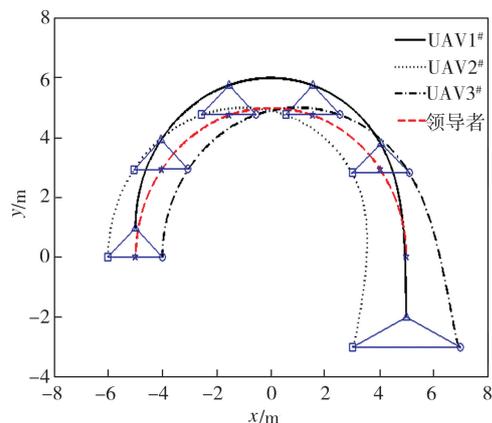
Table 1 Desired space and azimuth of the UAVs

无人机编号	$ d_i $	$\theta_i / (^\circ)$
1#	1	0
2#	1	90
3#	1	270

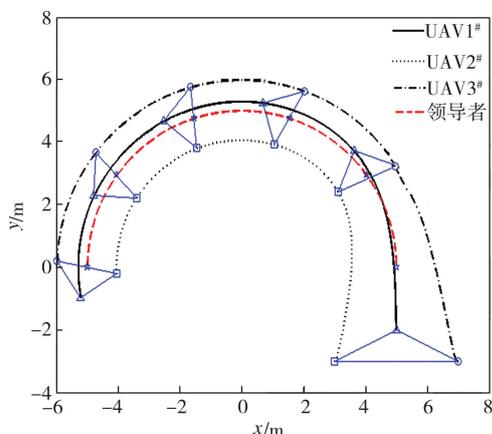
3.2 仿真结果

案例 1 采用文献[14]中的方法进行编队控制,案例 2 采用本文设计的算法进行编队控制,仿真结果如图 4 所示,图中示出了每台无人机和领

导者的运动轨迹以及每隔 3 s 时的位置。从图 4 中可以看出,在这两种情形下,群体无人机都能实现等腰三角形编队集结并保持队形运动。但是对于案例 1,图 4(a)中无人机保持的等腰三角形几何构型在领导者转变方向时没有相应地改变方向,而且无人机轨迹之间有很多交叉,表明无人机在运动过程中可能会发生碰撞,这在实践中是不允许的。对于案例 2,图 4(b)中的运动轨迹显示,无人机在改变几何构型的同时还可以相应改变行进方向,从而更好地避免碰撞;而且,即使只有单台无人机能从领导者那里获得信息,采用本文提出的一致性控制算法也可以得到期望的结果。



(a) 案例 1



(b) 案例 2

图 4 无人机飞行轨迹

Fig. 4 Flight paths of the UAVs

4 结语

本文采用一阶运动学模型描述群体无人机系统,用有向图来表示其通信网络结构,将领导者-跟随者控制结构和一致性跟踪理论相结合,提出了一种群体无人机编队控制算法,使得在无人机编队运动过程中,当领导者转变行进方向时可以相应改变无人机的运动方向并保持编队几何构型。本文提出的算法不同于集中式控制,不需要每台无人机都能接收到领导者的参考状态信息。

仿真实验验证了该控制算法的有效性。

参 考 文 献

- [1] 张晋武. 无人机编队飞行技术研究[J]. 舰船电子工程, 2015(8):9-12.
- [2] Mahmood A, Kim Y. Leader-following formation control of quadcopters with heading synchronization [J]. Aerospace Science and Technology, 2015, 47: 68-74.
- [3] No T S, Kim Y, Tahk M-J, et al. Cascade-type guidance law design for multiple-UAV formation keeping [J]. Aerospace Science and Technology, 2011, 15:431-439.
- [4] Kim S, Kim Y. Optimum design of three-dimensional behavioral decentralized controller for UAV formation flight [J]. Engineering Optimization, 2009, 41(3):199-224.
- [5] 胡玮韬. 多机器人编队及运动控制研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.
- [6] Han J, Li M, Guo L. Soft control on collective behavior of a group of autonomous agents by a skill agent [J]. Journal of Systems Science and Complexity, 2006, 19(1):54-62.
- [7] 雷斌. 群体机器人系统合作控制问题研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009.
- [8] 葛艳红, 李文锋, 董文涛. 物联网环境下群体机器人协同演化机制研究 [J]. 武汉理工大学学报, 2012, 34(9):135-138.
- [9] Leonard N E, Fiorelli E. Virtual leaders, artificial potentials and coordinated control of groups [C]// Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control. Orlando, Florida, 2001:2968-2973.
- [10] Ren W, Beard R W, McLain T W. Coordination variables and consensus building in multiple vehicle systems [M]// Kumar V, Leonard N, Morse A S. Cooperative Control, Lecture Notes in Control and Information Science, Vol 309. Springer, Berlin, Heidelberg, 2004:171-188.
- [11] Ren W. Multi-vehicle consensus with a time-varying reference state [J]. Systems and Control Letters, 2007, 56(7/8): 474-483.
- [12] Ren W. On consensus algorithms for double-integrator dynamics [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2008, 53(6): 1503-1509.
- [13] Ren W. Consensus tracking under directed interaction topologies; algorithms and experiments [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2010, 18(1):230-237.
- [14] 丁衍, 魏晨, 鲍树语. 基于一致性算法的时延多无人机编队分散化控制 [J]. 计算机应用, 2014, 34(S1):

- 151-155. approach[C]//AIAA Infotech@ Aerospace Conference. Seattle, Washington, April 2009. DOI: 10.2514/6.2009-1826.
- [15] Seo J, Ahn C, Kim Y. Controller design for UAV formation flight using consensus based decentralized

Consensus-based control method for geometrical configuration of UAVs formation flight

Yi Wen, Lei Bin

(1. College of Machinery and Automation, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China; 2. Institute of Robotics and Intelligent Systems, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

Abstract: This paper studied the geometrical configuration control method for the formation flight of group unmanned aerial vehicle (UAV) system. The first-order kinematic model was applied to the system description and a directed graph was used to simulate its communication network. On the basis of leader-follower control structure and consensus-based tracking theory, a cooperative control algorithm was presented, by which the UAVs could also change their heading directions in the process of transforming the geometrical configuration of formation flight, and it was not necessary for every UAV to receive the leader's status information. Finally, the validity of the proposed control algorithm was verified by simulations.

Key words: UAV; formation flight; geometrical configuration; consensus; cooperative control

[责任编辑 尚 晶]