

多无人机完全分布式有限时间编队控制

王丹丹, 宗 群, 张博渊[†], 秦新立

(天津大学 电气自动化与信息工程学院, 天津 300072)

摘要: 针对分布式通信网络, 研究多无人机完全分布式编队生成和保持控制问题. 基于滑模和自适应方法设计自适应耦合增益, 进而结合与邻居无人机之间的相对状态设计一种新的有限时间编队控制器. 该算法去掉了传统编队控制器依赖通信网络范围和拓扑及 Leader 无人机状态等全局信息的限制, 基于 Lyapunov 理论证明无人机编队误差在有限时间可以收敛到边界可调的邻域内. 对三维运动的多无人机编队进行仿真验证, 结果显示, 所设计的编队控制算法可以实现多无人机有限时间完全分布式编队生成和保持.

关键词: 无人机; 完全分布式; 有限时间; 编队控制; 滑模控制; 自适应控制

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Fully distributed finite-time formation control for multiple UAVs

WANG Dan-dan, ZONG Qun, ZHANG Bo-yuan[†], QIN Xin-li

(School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Considering the distributed communication network, the fully distributed formation building and keeping control problems for multiple unmanned aerial vehicles (UAVs) are studied. Adaptive coupling gains are designed based on sliding mode and adaptive methods, and then a novel finite-time formation controller is designed according to the relative state between neighbor UAVs and coupling gains. The proposed algorithm removes the limitation of global information, such as the range and topology of the communication network and the state of the Leader UAV. Based on the Lyapunov theory, the formation errors can converge to a small boundary adjustable neighborhood. Simulation of the three dimensional motion for multiple UAVs formation is conducted. The results show that the proposed algorithm can achieve the finite time fully distributed formation forming and keeping of UAVs.

Keywords: UAVs; fully distributed; finite-time; formation control; sliding mode control; adaptive control

0 引言

多无人机协同编队控制由于其在协同侦察、协同营救等军事和民用上的广泛应用吸引了国内外学者的广泛关注^[1]. 多无人机协同编队控制包含两个层次协同: 一是多个混合平台之间进行共享信息和任务来完成一个共同的目标, 主要包括任务平台、导航平台、制导平台和控制平台^[2]; 二是利用编队中其他无人机共享的信息设计编队控制器, 形成期望的编队飞行^[3].

随着一致性理论^[4-6]的发展, 无人机编队控制得到了深入研究^[7-11]. 针对多无人机编队保持问题, Kumar 团队^[7]基于一致性方法设计分布式编队轨迹跟踪控制器, 实现了四旋翼无人机紧密编队控制, 并通过实际飞行演示了算法的可靠性. Ghomma 等^[8]采用反步方法基于局部相对状态信息设计分布式编队保持控制器, 实现了多无人机三维轨迹鲁棒跟踪

控制, 仿真验证了该编队方法的有效性. 上述研究成果主要采用集中式编队控制结构, 控制算法不能保证有限时间内形成编队. 上述算法大部分要求每个 Follower 需知道 Leader 的状态或其上界以及全局通信拓扑的范围和结构等全局信息^[9-10], 然而, 对于分布式编队控制, Leader 的状态是不能被所有 Follower 获取的.

显然, 以上控制协议不是完全意义上的分布式控制器. Li 等^[9]、Sun 等^[10]和 Yang 等^[11]对完全一致性问题进行了深入研究, 但是已有的结果大部分是渐近稳定的一致性协议. Zong 等^[12]和 Tian 等^[13]证明了有限时间控制在鲁棒性和控制性能上要优于渐近稳定控制, 因此, 对于完全分布式有限时间编队控制器的设计非常具有意义. Liu 等^[14]对于一阶多智能体系统, 设计了一个自适应一致性的控制协议, 并实现了误差有限时间收敛到零, 但没有考虑外界干扰对系统的影

收稿日期: 2018-03-17; 修回日期: 2018-07-13.

责任编辑: 张维海.

[†]通讯作者. E-mail: 965225370@qq.com.

响.

基于此, 本文针对多无人机编队生成和保持问题, 采用自适应和滑模方法及有限时间理论, 设计有限时间完全分布式编队控制器, 以实现多无人机编队飞行. 本文的主要贡献有: 1) 设计一个新的有限时间完全分布式编队控制器, 之前很少有文献研究此类控制算法; 2) 控制器具有强抗干扰性, 并能抑制模型不确定; 3) 通过 Lyapunov 稳定性分析证明编队误差的有限时间收敛性. 最后通过仿真对比验证了所提出的控制算法的有效性和优越性.

1 预备知识

1.1 符号定义

对于向量 $x \in R^n$, $\text{sgn}(x)$ 表示相应符号函数, $\text{sig}(x)^{p/q} = [|x_1|^{p/q} \text{sgn}(x_1), \dots, |x_n|^{p/q} \text{sgn}(x_n)]^T$, 其中 x_i 为 x 的第 i 个元素. $\lambda_{\min}(A)$ 表示矩阵 A 的最小特征值.

1.2 图论

假设 $G = \{V, E, A\}$ 是一个无向图, 其中节点表示无人机, 其边的集合分别为

$$V = \{v_i, i = 1, 2, \dots, n\},$$

$$E = \{e_{ij} = (v_i, v_j), i, j = 1, 2, \dots, n\}.$$

图 G 的加权邻接矩阵为 $A = [a_{ij}] \in R^{n \times n}$, 当且仅当 $e_{ij} = (v_i, v_j) \in E$ 时, $a_{ij} = a_{ji} > 0$, 否则 $a_{ij} = 0$. 规定 $a_{ii} = 0$, 图的 Laplacian 矩阵记为

$$L = D - A.$$

其中: $D = \text{diag}\{d_i\}$, $d_i = \sum_{j=1}^n a_{ij}$, $i = 1, 2, \dots, n$. 对于 Leader-follower 编队, $b_i = 1$ 表示无人机可以接受 Leader 的状态信息. 根据文献[3], $H = L + B$ 是正定矩阵, 其中 $B = \text{diag}\{b_1, \dots, b_n\}$.

1.3 相关引理

引理 1 [3] 针对微分系统 $\dot{x}(t) = f(x(t), u)$, 其中 $x \in R^n$ 是系统状态, u 为控制输入. 假设存在一个连续函数 $V(x)$ 和标量 $\lambda > 0, 0 < \alpha_0 < 1, 0 < k < \infty$, 使得 $\dot{V}(x) \leq \lambda V^{\alpha_0}(x)$ 成立, 则称系统的解有限时间稳定, 收敛时间满足 $T \leq V^{1-\alpha_0}(x_0)/(\lambda(1-\alpha_0))$. 进一步, 如果 $\dot{V}(x) \leq \lambda V^{\alpha_0}(x) + k$ 成立, 则系统 $\dot{x}(t) = f(x(t), u)$ 的解是实际有限时间稳定的.

引理 2 [3] 对于实数 $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 和 $0 < k < 1$, 下面的不等式成立:

$$(|x_1| + \dots + |x_n|)^k \leq |x_1|^k + \dots + |x_n|^k,$$

$$\sum_{i=1}^3 |x_i|^k \geq \left(\sum_{i=1}^3 |x_i|^2 \right)^{(1+k)/2}. \quad (1)$$

2 主要结论

2.1 问题描述

考虑 n 个无人机组成的编队系统, 每架无人机的控制结构如图 1 所示. 本文主要研究编队的生成和保持, 不考虑无人机姿态运动动态. 将每架无人机看成运动的质点, 于是无人机 i 的运动模型可采用二阶积分模型[3]

$$\begin{cases} \dot{P}_i = V_i, \\ \dot{V}_i = U_i + d_i, \quad i = 0, 1, \dots, n. \end{cases} \quad (2)$$

其中: P_i 和 V_i 分别为第 i 个无人机的位置和速度, U_i 为对应的控制输入, d_i 为外界干扰和模型不确定, 0 代表虚拟 Leader 无人机, 已经通过轨迹规划获取了最优轨迹.

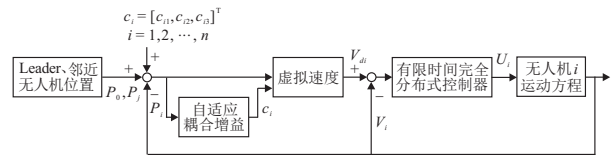


图 1 多无人机编队控制结构框图

控制目标: 设计控制输入 U_i , 使得各个直升机模型在参数不确定和外界干扰影响的情况下, 系统输出状态可以在有限时间 T 内实现多无人机编队保持期望编队构型, 即

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow T} (P_L - P_i) &= -b_i, \\ \lim_{t \rightarrow T} (P_j - P_i) &= (b_j - b_i). \end{aligned} \quad (3)$$

其中: 常向量 $b_i = [b_{i1}, b_{i2}, b_{i3}]^T$, 表示无人机 i 需要与 Leader 保持的三维相对距离; T 表示有限时间.

假设 1 Leader 无人机与 Follower 无人机之间是无向通信网络.

假设 2 无人机运动过程中的外界干扰和模型不确定是有界的[3,13].

2.2 完全分布式控制器设计

首先, 为实现无人机 i 在有限时间内与其他无人机形成期望的编队构型, 对系统 (2) 设计虚拟速度 V_{di} ; 然后为实现对虚拟速度的有限时间跟踪设计控制器 U_i . 所设计的虚拟速度控制器如下:

$$V_{di} = -k_1 c_i \text{sgn} \left(\sum_{j=0}^n a_{ij} e_{P_i} \right) - k_{2i} c_i \text{sig} \left(\sum_{j=0}^n a_{ij} e_{P_i} \right)^{p/q}, \quad (4)$$

$$\dot{c}_i = \kappa_i \left[-f_i c_i + k_1 \left\| \sum_{j=0}^n a_{ij} e_{P_i} \right\| + k_{2i} \sum_{j=0}^n a_{ij} e_{P_i}^T \text{sig} \left(\sum_{j=0}^n a_{ij} e_{P_i} \right)^{p/q} \right]. \quad (5)$$

其中: $e_{P_i} = P_i - P_j + b_i - b_j$ 为编队位置误差, k_1 、 k_{2i} 为正实数. 定义速度跟踪误差 $e_{V_i} = V_{di} - V_i$, 如式(4)和(5)所示, 依据有限时间理论设计终端滑模外环控制器

$$U_i = k_3 \text{sig}(e_{V_i})^{p/q} + k_{4i} \text{sgn}(e_{V_i}) + \dot{V}_{di}. \quad (6)$$

其中: k_3 、 k_{4i} 为正实数; 第1项为终端滑模项, 用来保证无人机有限时间跟踪期望虚拟速度 V_{di} ; 第2项用来鲁棒外界干扰 d_{V_i} , 并加快误差收敛速度.

定理1 对于系统(2), 如果设计虚拟速度和自适应耦合增益 c_i 为式(4)和(5), 外环控制器为式(6), 选择增益满足 $k_{1i} > 0$, $k_{2i} > 0$, $k_3 > \|d_{V_i}\|$, $k_{4i} > 0$, 则系统编队误差 e_{P_i} 和 e_{V_i} 是实际有限时间稳定的.

证明 1) 首先证明外环控制器 U_i 可以使速度 V_i 有限时间跟踪上虚拟速度 V_{di} . 选取 Lyapunov 函数

$$\Phi_1 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n e_{V_i}^T e_{V_i}, \quad (7)$$

对式(7)求导, 得到

$$\begin{aligned} \dot{\Phi}_1 &= \sum_{i=1}^n e_{V_i}^T (\dot{V}_{di} - U_i - d_{V_i}) \leq \\ &-k_3 \Phi_1^{(p+q)/2q} - \sum_{i=1}^n k_{4i} \|e_{V_i}\| + \\ &\sum_{i=1}^n \|e_{V_i}\| \|d_{V_i}\|. \end{aligned}$$

由假设2知, 干扰 $\|d_{V_i}\|$ 是有界的, 选择增益 k_{4i} 满足 $k_{4i} > \|d_{V_i}\|$, 于是 Lyapunov 函数 $\dot{\Phi}_1 \leq -k_3 \Phi_1^{(p+q)/2q}$. 因此, 速度 V_i 可以在有限时间跟踪上虚拟速度 V_{di} .

2) 然后证明编队位置误差 e_{P_i} 实际有限时间收敛到零. 选取 Lyapunov 函数

$$\Phi_2 = \frac{1}{2} E^T H E + \sum_{i=1}^n \frac{(c - c_i)^2}{2\kappa_i}. \quad (8)$$

其中: $\tilde{c}_i = c - c_i$, c 是某一个有界正实数. 对 Lyapunov 函数(8)求导, 得

$$\begin{aligned} \dot{\Phi}_2 &= E^T H \dot{E} - \sum_{i=1}^n \frac{c - c_i}{\kappa_i} \dot{c}_i = \\ &E^T H (\dot{P} - 1_n \otimes \dot{P}_0) - \sum_{i=1}^n (c - c_i) \dot{c}_i = \\ &\sum_{i=1}^n e_{P_i}^T H (V_{di} - e_{V_i} - \dot{P}_0) - \sum_{i=1}^n (c - c_i) \dot{c}_i = \\ &\sum_{i=1}^n e_{P_i}^T H \left[-k_1 c_i \text{sgn} \left(\sum_{j=0}^n a_{ij} e_{P_i} \right) - \right. \\ &\left. k_{2i} c_i \text{sig} \left(\sum_{j=0}^n a_{ij} e_{P_i} \right)^{p/q} - e_{V_i} - \dot{P}_0 \right] - \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &- \sum_{i=1}^n (c - c_i) \left[-f c_i + k_1 \left\| \sum_{j=0}^n a_{ij} e_{P_i} \right\| + \right. \\ &\left. k_{2i} \sum_{j=0}^n a_{ij} e_{P_i}^T \text{sig} \left(\sum_{j=0}^n a_{ij} e_{P_i} \right)^{p/q} \right]. \quad (9) \end{aligned}$$

其中: $e_{V_i} = V_{di} - V_i$, $E = [e_{P_1}, \dots, e_{P_n}]^T$. 由第1步知, 无人机速度跟踪误差 e_{V_i} 是全局有界的, 虚拟 Leader 的状态为规划的轨迹, 所以 Leader 的速度是有界的. 假设 $\|e_{V_i} + \dot{P}_0\| \leq \gamma$, 则

$$\begin{aligned} \dot{\Phi}_2 &\leq -c \sum_{i=1}^n e_{P_i}^T H \left[k_1 c_i \text{sgn} \left(\sum_{j=0}^n a_{ij} e_{P_i} \right) + \right. \\ &\left. k_{2i} c_i \text{sig} \left(\sum_{j=0}^n a_{ij} e_{P_i} \right)^{p/q} \right] + \\ &\|e_{V_i} + \dot{P}_0\| \|EH\| + \sum_{i=1}^n f_i \tilde{c}_i c = \\ &-(c \lambda_{\min}(H) - \gamma) \|EH\| - \\ &ck_1 E^T H \sum_{j=0}^n a_{ij} \text{sig}(e_{P_i})^{p/q} + \sum_{i=1}^n f_i \tilde{c}_i c. \quad (10) \end{aligned}$$

当 $c \lambda_{\min}(H) - \gamma > 0$ 时, 参考文献[3], 式(10)变为

$$\begin{aligned} \dot{\Phi}_2 &\leq -ck_1 E^T H \sum_{j=0}^n a_{ij} \text{sig}(e_i)^{p/q} + \sum_{i=1}^n f_i \tilde{c}_i c \leq \\ &-ck_1 E^T H \sum_{j=0}^n a_{ij} \text{sig}(e_i)^{p/q} - \\ &\frac{2f_i f_{i0}}{2f_{i0} - 1} \sum_{i=1}^n (c_i - c)^2 + \frac{f_i f_{i0}}{2} \sum_{i=1}^n c^2. \quad (11) \end{aligned}$$

其中: $\text{sig}(x)^{p/q} = [|x_i|^{p/q} \text{sgn}(x_i)]_n^T \in R^n$, $0 < f_{i0} < 1/2$. 于是 Lyapunov 函数的导数为

$$\begin{aligned} \dot{\Phi}_2 &\leq -ck_1 \left(\frac{2f_i f_{i0}}{2f_{i0} - 1} \sum_{i=1}^n (c_i - c)^2 \right)^{(p+q)/2q} - \\ &ck_1 \left(\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n e_i^T L e_i \right)^{(p+q)/2q} + \frac{f_i f_{i0}}{2} \sum_{i=1}^n c^2 = \\ &-ck_1 \Phi_2^{(p+q)/2q} + \frac{f_i f_{i0}}{2} \sum_{i=1}^n c^2. \quad (12) \end{aligned}$$

根据引理2和文献[3]容易证明, Lyapunov 函数是实际有限时间稳定的. 所以由式(7)可知, 编队误差 e_{P_i} 有限时间收敛到一个边界可调的邻域, 且实现了 c_i 收敛到 c 的一个边界可调的邻域. 因此, 式(6)实现了完全分布式编队. □

注1 本文设计的完全分布式协议与传统完全一致性协议^[11-13]相比, 实现了有限时间收敛, 提高了收敛速度. 与已有无人机编队控制算法相比, 去除了控制增益依赖全局通信拓扑的结构、Leader 的速度等全局信息.

3 仿真验证

考虑一个包含1架虚拟Leader无人机和8架无人机编队系统,其中Leader的飞行轨迹由轨迹规划给出.通信拓扑如图2所示.

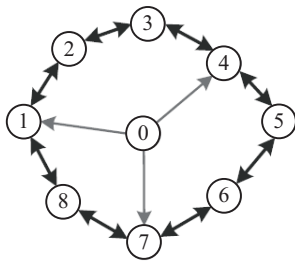


图2 无人机0~8的通信拓扑图

3.1 参数设置

每架无人机和Leader的三维初始速度为0 m/s,初始位置为

$$\begin{aligned}
 P_0 &= [1; 2; 3] \text{ m}; P_1 = [6; 0; 0] \text{ m}; \\
 P_2 &= [3; 0; 0] \text{ m}; P_3 = [-3; 0; 0] \text{ m}; \\
 P_4 &= [-6; 0; 0] \text{ m}; P_5 = [-9; 0; 0] \text{ m}; \\
 P_6 &= [-12; 0; 0] \text{ m}; P_7 = [0; 0; 0] \text{ m}; \\
 P_8 &= [12; 0; 0] \text{ m}.
 \end{aligned}$$

期望的构型为

$$\begin{aligned}
 b_1 &= [-5; 0; 0] \text{ m}; b_2 = [-2.5; 2.5; 0] \text{ m}; \\
 b_3 &= [0; 5; 0] \text{ m}; b_4 = [2.5; 2.5; 0] \text{ m}; \\
 b_5 &= [5; 0; 0] \text{ m}; b_6 = [2.5; -2.5; 0] \text{ m}; \\
 b_7 &= [0; -5; 0] \text{ m}; b_8 = [-2.5; -2.5; 0] \text{ m}.
 \end{aligned}$$

编队控制器的参数为 $k_1 = 0.01, k_{2i} = 1, k_3 = 2, k_{4i} = 1$.自适应参数 c_i 的初始值为0, $\kappa_i = 0.01, f_1 = f_2 = f_5 = 15, f_3 = 25, f_4 = 1, f_6 = 8, f_7 = 10, f_8 = 5$.

3.2 仿真分析

图3给出了Leader无人机和8架无人机三维编队飞行图,多机编队可以形成并保持期望的队形.

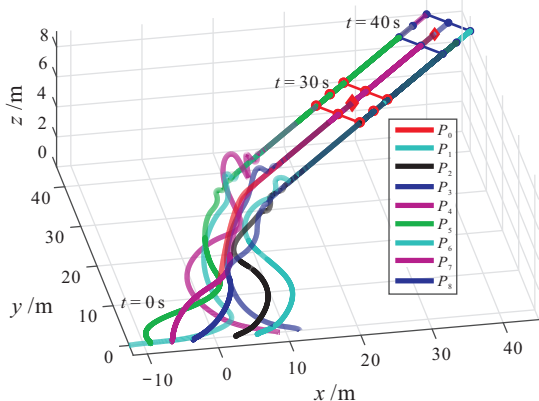


图3 多架无人机三维编队飞行图

为了比较算法的优越性,在保证控制器增益相同的情况下给出仿真对比.图4中的实线为本文算法,虚线为文献[9]的一致性协议(4).进一步,图5给出了第1架无人机在 x, y, z 方向的误差放大图.可以看出:本文控制算法收敛精度更高,收敛时间为18 s;而文献[9]中的算法(4)收敛时间为25 s.

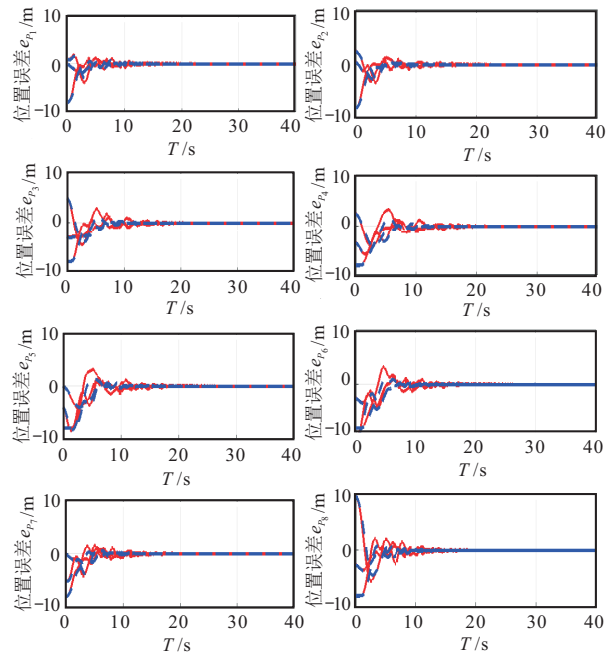


图4 第1~8架无人机编队误差曲线

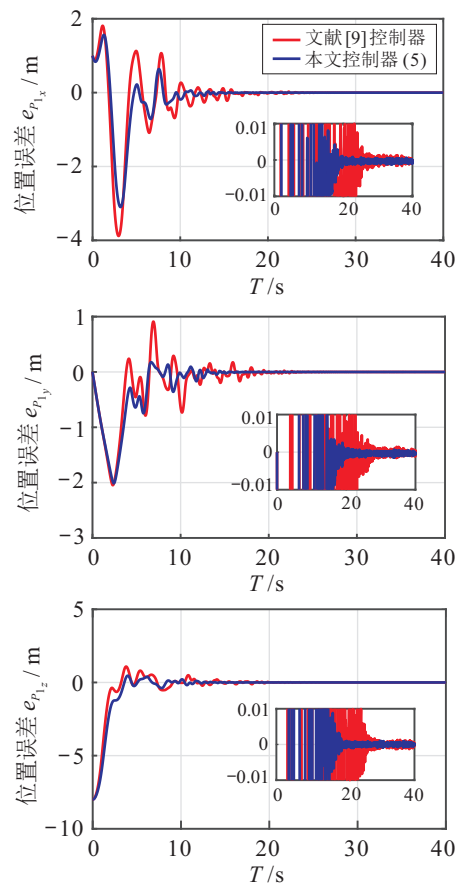


图5 第1架无人机和Leader的位置误差曲线

4 结论

本文针对多无人机编队生成和保持问题,利用自适应和滑模方法设计有限时间完全分布式控制器,实现了多无人机快速形成并保持编队.改进了传统完全分布式一致性协议的收敛速度,并通过引入滑模项对干扰和模型不确定进行很好的鲁棒.自适应耦合增益不仅解决了控制器依赖全局信息,而且也降低了误差的抖振.仿真结果验证了算法的有效性,并通过仿真对比表明了本文算法的优越性.

参考文献(References)

- [1] 宗群, 王丹丹, 邵士凯, 等. 多无人机协同编队飞行控制研究现状及发展[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(3): 1-14.
(Zong Q, Wang D D, Shao S K, et al. Research status and development of multi UAV coordinated formation flight control[J]. J of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(3): 1-14.)
- [2] Shen L C, Niu Y F, Zhu H Y. Theories and methods of autonomous cooperative control for multiple UAVs[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013: 7-9.
- [3] Wang D D, Zong Q, Tian B L, et al. Neural network disturbance observer-based distributed finite-time formation tracking control for multiple unmanned helicopters[J]. ISA Trans, 2018, 73: 208-226.
- [4] Olfatisaber R, Murray R M. Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2004, 49(9): 1520-1533.
- [5] Ren W, Beard R. Consensus seeking in multiagent systems under dynamically changing interaction topologies[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2005, 50(5): 655-661.
- [6] Jadbabaie A, Lin J, Morse A S. Coordination of groups of mobile autonomous agents using nearest neighbor rules[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2003, 48(6): 988-1001.
- [7] Turpin M, Michael N, Kumar V. Decentralized formation control with variable shapes for aerial robots[C]. IEEE Int Conf on Robotics and Automation. Saint Paul: IEEE, 2012: 23-30.
- [8] Ghommam J, Luque-Vega L F, Castillo-Toledo B, et al. Three-dimensional distributed tracking control for multiple quadrotor helicopters[J]. J of the Franklin Institute, 2016, 353(10): 2344-2372.
- [9] Li Z K, Ren W, Liu X D, et al. Consensus of multi-agent systems with general linear and lipschitz nonlinear dynamics using distributed adaptive protocols[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2011, 58(7): 1786-1791.
- [10] Sun J Y, Geng Z Y, Lv Y Z, et al. Distributed adaptive consensus disturbance rejection for multi-agent systems on directed graphs[J]. IEEE Trans on Control of Network Systems, 2018, 5(1): 629-639.
- [11] Yang D, Ren W, Liu X. Fully distributed adaptive sliding-mode controller design for containment control of multiple Lagrangian systems[J]. Systems Control Letters, 2014, 72: 44-52.
- [12] Zong Q, Wang J, Tao Y. Adaptive high-order dynamic sliding mode control for a flexible airbreathing hypersonic vehicle[J]. Int J of Robust and Nonlinear Control, 2013, 23(15): 1718-1736.
- [13] Tian B L, Yin L P, Wang H. Finite-time reentry attitude control based on adaptive multivariable disturbance compensation[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2015, 62(9): 5889-5898.
- [14] Liu K X, Wu L L, Lv J H, et al. Finite-time adaptive consensus of a class of multi-agent systems[J]. Science China Technological Sciences, 2016, 59(1): 22-32.

作者简介

王丹丹(1987—), 女, 博士生, 从事多无人机编队控制、多智能体事件触发控制及脉冲切换时滞系统稳定性的研究, E-mail: dandanwang0910@163.com;

宗群(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 从事飞行器制导与鲁棒自适应控制、多智能体编队协调控制、故障诊断与容错控制、复杂系统建模与优化控制等研究, E-mail: zongqun@tju.edu.cn;

张博渊(1990—), 男, 博士生, 从事无人机任务分配和轨迹规划的研究, E-mail: 965225370@qq.com;

秦新立(1992—), 男, 硕士生, 从事机器人任务分配和轨迹规划的研究, E-mail: xlqin@tju.edu.cn.

(责任编辑: 李君玲)