

具有通信时延下多无人机编队控制

周绍磊, 康宇航, 郭志强, 李松林, 祁亚辉

海军航空工程学院控制工程系, 烟台 264001

摘要 针对具有二阶动力学特性多无人机系统模型, 在具有通信时延及编队构型时变的情况下, 本文提出了一种基于一致性理论的编队控制算法。首先将多个无人机的时变编队控制问题转换成闭环系统的渐近稳定问题; 然后通过构造 Lyapunov-Krasovskii 函数, 并以线性矩阵不等式 (linear matrix inequality) 的形式给出多无人机编队系统时变编队稳定的充分条件; 最后以被视为质点的多无人机系统为例进行了仿真验证。结果表明: 当通信时延、控制协议参数等满足稳定条件时, 文中提出的编队控制算法能使多无人机编队系统形成期望的时变编队队形。

关键词 时延; 无人机; 时变编队; 线性矩阵不等式

未来的战争越来越激烈, 由此引起的人员伤亡与财力消耗也越来越大, 为了减少人员伤亡率并降低战争费用, 无人机在战争中的使用愈发普遍, 且其在战争中所占比重也呈增长趋势。可是无论单个无人机的功能和效用如何提高, 其自身的性能(载荷量、续航时间、探测视野、攻击火力等)毕竟有限^[1-3]。与之相比, 多个无人机协作优点更多, 可以弥补单个无人机性能的种种不足。比如当执行某项任务需要数种携带不同传感器的无人机时, 单个无人机由于载重有限不可能完成, 而如果让携带不同传感器的多个无人机协同完成这一任务, 单个无人机的不足将不存在; 又例如如果单个无人机在执行任务的过程中由于被敌方攻击武器摧毁或者自身故障而无法继续完成任务, 多无人机编队系统中的其他无人机可以继续执行任务^[4-6]。

美国空军在 2016 年 5 月对外发布的《小型无人机系统飞行计划(2016—2036)》中, 美国空军提出了一种蜂群无人机编队作战概念(图 1)。图 1 中的蜂群无人机编队是由小型的相互独立的无人机组成的智能群, 这些无人机能够进行相互通信以便安全做出一些规定的动作, 完成任务。在完成作战任务的过程中, 军方工作人员可以对蜂群无人机编队进行干预、监督。蜂群无人机编队能够执行的军事任务也比较多, 可以实施压制/摧毁敌防空任务、打击协同与侦察任务、反无人系统任务、超视距任务、传感器空投任务、机载分层网络任务等等, 对军事作战具有非常大的用途, 而且蜂群无人机的成本普遍比较低、生命周期长, 面对有限的财政预算环境, 价值非常高。

信息交互是保证多无人机编队安全稳定控制的前提, 然

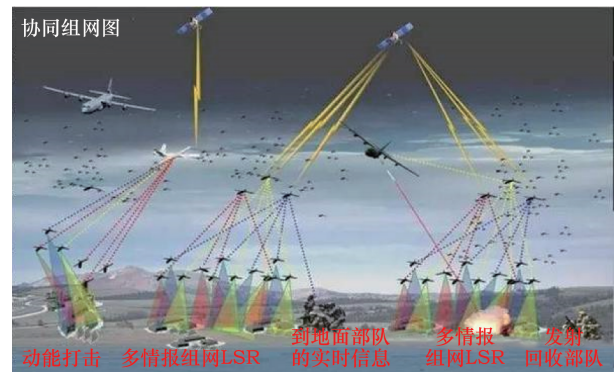


图 1 蜂群无人机编队作战概念示意

Fig. 1 Concept of swarm UAVs formation combat

而编队内无人机之间的通信总会受到天气、电磁干扰、网络拥堵、通信设备间歇性故障等因素的影响而使信息交互存在延迟。尽管现存的一些优化控制方法本身具有一定鲁棒性, 能够在一定程度在减小乃至消除通信时延的影响, 但是当通信延迟较大时这些控制方法很可能无法保证编队内无人机之间正常信息交互以致编队失控, 因此研究存在通信时延条件下的编队控制具有十分重要的现实意义。一般可将存在通信时延条件下的编队控制研究方法分为以下 5 类: 状态扩维法、频域法、时域 Lyapunov 类分析方法、基于 Hamilton 耗散理论的编队控制方法、基于信息滤波的时延补偿方法^[7-8]。

1) 状态扩维法。

状态扩维法主要用来解决存在通信时延条件下的离散系统编队控制问题, 一般来说, 该方法是利用状态扩维对原系统进行变换, 以使其变为部分不存在时延的编队系统, 进

收稿日期: 2016-12-15; 修回日期: 2017-03-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(61102167); 航空科学基金项目(20135184007)

作者简介: 周绍磊, 教授, 研究方向为无人机自主控制与制导, 电子邮箱: zhouslsd@sina.com

引用格式: 周绍磊, 康宇航, 郭志强, 等. 具有通信时延下多无人机编队控制[J]. 科技导报, 2017, 35(7): 77-82; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2017.07.009

而在通过代数矩阵与图论等相关理论对新系统进行分析求解^[9-12]。

2) 频域法。

在解决存在通信时延条件下的编队控制问题中,频域法主要是利用拉普拉斯变换对编队系统进行频域变换,进而通过奈奎斯特定理等频域分析理论对新系统进行分析求解^[13-16]。针对存在不同通信时延且通信网络为静态有向连通图的二阶多智能体编队控制系统,文献[17]提出了一种新型编队协调控制器算法,然后应用频域分析方法证明了系统协调稳定的条件。针对存在不同通信时延且通信网络拓扑为有向离散多智能体系统,文献[18]提出了一种基于一致性理论的编队控制器,通过将编队系统转换为传递函数,然后利用频域分析法(奈奎斯特准则与盖尔圆原理)得到了系统一致性收敛的充分条件。针对通信网络拓扑为有向加权且存在不同通信时滞的多智能体编队系统,文献[19]设计了一种基于广义奈奎斯特准则的编队控制器,得到了在该控制器作用下的编队控制与通信时滞无关的结论。针对存在不同通信时延且通信网络拓扑为非对称有向加权图的多智能体编队系统,文献[20]运用频域分析与广义奈奎斯特准则对其一致性进行研究,得到了系统的稳定仅与输入时延有关,而与通信时延无关的结论。针对存在通信时延条件下的多机器人编队控制问题,文献[21]设计了一种基于一致性理论的多机器人编队系统控制器,通过频域分析法得到了通信时延上界与编队控制器参数和拉普拉斯(Laplace)矩阵特征值的关系。

3) 时域 Lyapunov 分析方法。

时域 Lyapunov 分析方法主要用来解决存在通信时延条件下的连续系统编队控制问题,该方法是通过构造 Lyapunov-Krasovskii 函数^[22]、Lyapunov-Razumikhin 函数^[23]、Set-valued Lyapunov^[24]函数,并结合矩阵不等式对系统的稳定性进行分析求解。针对存在通信时延条件下的多导弹协同制导一致性问题,文献[25]通过图论理论将原问题转换为分歧系统的渐近稳定性问题,并设计了基于 Lyapunov 的编队协同控制器。针对存在通信时延条件下水下无人航行器的一致性跟踪问题,文献[26]设计了基于一致性理论的编队控制器,并通过 Lyapunov 稳定性理论得到了系统渐近稳定的充分条件。针对存在通信时滞的卫星编队协同控制问题,文献[27]通过构造 Lyapunov-Krasovskii 函数得到了系统渐近稳定的充分条件,在此基础上设计了基于自适应滑模的编队控制器,以抑制外部干扰,仿真验证了该方法的有效性。针对具有通信时滞的无人机编队控制问题,文献[28]结合分散化控制策略与分层控制结构提出了一种基于一致性理论的无人机状态估计器与编队保持控制器,并先后利用李雅普诺夫函数与线性矩阵不等式得到了系统渐近稳定的充分条件与通信时滞的上界。针对通信拓扑为强连通平衡图且存在通信时滞条件下的多智能体编队控制问题,文献[29]通过在编队控制器中引入一致性增益,证明了无论通信网络拓扑如何变化,

只要通信时滞满足给定的上界条件,则编队系统渐近稳定。针对存在通信时延且通信网络拓扑为有向条件下的一阶领导-跟随多智能体系统的编队控制问题,文献[30]提出了多智能体系统的滞后一致性概念,并设计了基于一致性理论的编队控制器以得到系统达到一致滞后的充分条件。

4) 基于 Hamilton 耗散理论的编队控制方法。

Hamilton 耗散理论分析方法是时域 Lyapunov 分析方法演变过来的,它主要是在 Lyapunov 分析方法的基础上引进了耗散这一概念,用以解决系统能力的输入输出平衡^[8]。针对存在通信时延条件下的多机器人编队控制问题,文献[31]采用了 Port-Hamilton 的框架描述虚拟人工势场(virtual body artificial potential, VBAP)编队方法,编队中的机器人被视为能量处理元素,其功率端口被看成为扩散能量模式。通信能够使能量处理元素的各种信息经过功率端口传递到其他能量处理元素,这种能量扩散方式与通信模式可以消除通信时延(无论通信时延多大)影响。耗散理论的编队控制方法比较适合智能体运动模型为非线性的编队控制,建模相对复杂,此外,如何将编队控制模型转化为通信时延下的 Hamilton 形式也是一个难点。

5) 基于信息滤波的时延补偿方法。

信息滤波是在卡尔曼滤波的基础上发展起来的,是一种分布式滤波算法,基于信息滤波的时延补偿方法是指结合信息滤波与一致性算法得到的编队控制器,并以此消除通信时延对编队飞行控制的影响。针对通信和测量受限的异构多无人机网络化分布式协同目标观测与跟踪问题,文献[32]提出了一种改进的一致性信息滤波算法,并引入了通信连接鲁棒性作为目标代价函数的一部分,以此补偿通信时延带来的影响。在实际战场下,由于受到环境和无人机自身等因素的影响,各无人机之间的通信带有一定延迟,基于此,文献[33]设计了一种信息补偿机制来尽可能地使多机之间的信息达到一致性,消除通信延迟带来的影响。

本文研究的是存在通信时延条件下,具有二阶动力学特性的多无人机时变编队的控制问题。首先基于一致性理论设计了多无人机编队控制协议,然后构造了多无人机编队系统的 Lyapunov-Krasovskii 方程,并得到了系统一致性的充分条件,当编队系统满足一定条件时,多无人机编队能够形成时变编队。文章整体结构包括预备知识、问题描述、时变编队控制器设计、仿真验证和结论。

1 预备知识

1.1 符号约定

本文中,符号 $\mathbb{R}^{m \times n}$ 和 $\mathbb{C}^{m \times n}$ 分别表示 $m \times n$ 的实矩阵和复矩阵。 I_n 是 $n \times n$ 维的单位矩阵。 $A > B$ 和 $A \geq B$ 分别表示 $A - B$ 是正定和半正定的。 $A \otimes B$ 表示矩阵 A 和 B 的 Kronecker 积。

1.2 图论基础知识

定义有向图 $G = (V, E, A)$, 其中 $B = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 为图 G 的节点集, $E \subseteq V \times V$ 为图 G 的边集, $A = [a_{ij}] \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 为图 G 的加权邻接

矩阵。当节点*j*存在信息流向节点*i*时, $a_{ij}=1$, 否则 $a_{ij}=0$ 。定义 Laplace 矩阵 $L=[l_{ij}] \in R^{n \times n}$ 为 $L=D-A$, 其中

$$l_{ij} = \begin{cases} -a_{ij} & i \neq j \\ \sum_{j=1, j \neq i}^n a_{ij} & j = i \end{cases}$$

如果存在一个节点 v_i , 从这个点出发沿着有向边可以到达图中的任意其他点, 称图 G 包含一个有向生成树 (spanning tree), 该节点 v_i 为根节点 (root)^[34]。

引理 1^[35-36]: 图 G 的 Laplacian 矩阵 L 至少有一个零特征值, 其他特征值均具有正实部; 如果 G 包含有向生成树, 则 0 是 L 的单特征值, $\mathbf{1}_n$ 是其对应的右特征向量。

引理 2^[37]: Schur 补: 对给定的对称矩阵 $S=S^T = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ * & S_{22} \end{bmatrix}$, 其中 $S_{11} \in R^{n \times n}$ 。以下 3 个条件是等价的:

- 1) $S < 0$;
- 2) $S_{11} < 0, S_{22} - S_{12}^T S_{11}^{-1} S_{12} < 0$;
- 3) $S_{22} < 0, S_{11} - S_{12} S_{22}^{-1} S_{12}^T < 0$ 。

定理 1: 对于定常系统, 如果存在一个具有连续一阶导数的标量 $V(x), V(0)=0$, 并且对状态空间 X 中的一切非零点 x 满足如下条件^[38]:

- 1) $V(x)$ 为正定;
- 2) $\dot{V}(x)$ 为负半定;
- 3) 对任意的 $x \in X, \dot{V}(x(t); x_0, 0) \neq 0$;
- 4) 当 $\|x\| \rightarrow \infty$ 时, $V(x) \rightarrow \infty$ 。

则系统的远点平衡状态是大范围渐近稳定的。

2 基于一致性理论的多无人机控制协议涉及与系统稳定性证明

2.1 问题描述

考虑由 N 个无人机组成的有向多无人机编队系统, 多无人机之间通信拓扑用有向图 G 描述。本文主要研究存在通信时延条件下多无人机编队系统的时变编队形成, 并没有考虑无人机内环控制情况, 所以无人机被视为质点处理, 如此可以得到第 i 个无人机运动方程的状态空间描述为^[39-41]。

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = v_i(t) \\ \dot{v}_i(t) = u_i(t) \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

式中, $x_i(t) \in R^2$ 为无人机 i 的位置; $v_i(t) \in R^2$ 为无人机 i 的速度; $u_i(t) \in R^2$ 是无人机 i 的控制输入。

控制协议设计的目的就是使编队系统内所有的无人机达到期望的位置与速度, 即系统 (1) 达到一致, 此时可以得到

$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow +\infty} x_i(t) - x_{id}(t) = 0 \\ \lim_{t \rightarrow +\infty} v_i(t) - v_{id}(t) = 0 \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

式中, $x_{id}(t) \in R^2$ 为无人机 i 的期望位置; $v_{id}(t) \in R^2$ 为无人机 i 的期望速度。

为了解决上述多无人机的一致性问题的, 本文参考文献 [40]、[41] 的控制器设计思想, 在考虑通信时延的前提下设计第 i 个无人机的控制协议为

$$u_i(t) = -k_1(x_i(t) - x_{id}(t)) - k_2(v_i(t) - v_{id}(t)) + k_3 \sum_{j \in N_i} a_{ij}((x_j(t-\tau) - x_{jd}(t-\tau)) - (x_i(t-\tau) - x_{id}(t-\tau))) + k_4 \sum_{j \in N_i} a_{ij}((v_j(t-\tau) - v_{jd}(t-\tau)) - (v_i(t-\tau) - v_{id}(t-\tau))) \quad (3)$$

根据多无人机系统期望时变队形的位置及速度信息, 令 $\bar{x}_i(t) = x_i(t) - x_{id}(t), \bar{v}_i(t) = v_i(t) - v_{id}(t)$, 则控制协议 (3) 可以变换为

$$u_i(t) = -k_1 \bar{x}_i(t) - k_2 \bar{v}_i(t) + k_3 \sum_{j \in N_i} a_{ij}(\bar{x}_j(t-\tau) - \bar{x}_i(t-\tau)) + k_4 \sum_{j \in N_i} a_{ij}(\bar{v}_j(t-\tau) - \bar{v}_i(t-\tau)) \quad (4)$$

如果取 $\eta(t) = [\bar{x}_1(t), \bar{v}_1(t), \dots, \bar{x}_N(t), \bar{v}_N(t)]^T$, 则

$$\dot{\eta}(t) = (I_N \otimes A)\eta(t) + (L \otimes B)\eta(t-\tau) \quad (5)$$

式中, $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -k_1 & -k_2 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ k_3 & k_4 \end{bmatrix}$, \otimes 为 Kronecker 乘积, L 为图 G 的 Laplacian 矩阵。如果 $\lim_{t \rightarrow +\infty} \eta(t) = 0$, 则 $\lim_{t \rightarrow +\infty} \bar{x}_i(t) = 0, \lim_{t \rightarrow +\infty} \bar{v}_i(t) = 0$, 进而 $\lim_{t \rightarrow +\infty} [x_i(t) - x_{id}(t)] = 0, \lim_{t \rightarrow +\infty} [v_i(t) - v_{id}(t)] = 0$, 即系统能够渐近稳定于 0, 那么多无人机就实现了时变编队, 参考文献 [42] 中的一致性控制器设计方法, 令 $k_1=k_3, k_2=k_4, B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ k_1 & k_2 \end{bmatrix}$ 。

2.2 分布式控制器设计

定理 2: 对于一个具有通信延迟及切换拓扑的多无人机系统, 如果在整个时变编队飞行过程中, 线性矩阵不等式满足如下条件, 那么多无人机系统最终能够实现预期的编队队形, 并且能够实现跟踪轨迹。

$$\begin{bmatrix} \tau B^T P B & -(B^T P + \tau B^T P A) \\ -(P B + \tau A^T P B) & A^T P + P A + \tau A^T A \end{bmatrix} \leq 0 \quad (6)$$

2.2 分布式控制器设计

其中, $P > 0$ 。

证明: 选取如下 Lyapunov-Krasovskii 函数

$$V(t) = \eta^T(t)(I_N \otimes P)\eta(t) + \int_{-\tau}^0 \int_{t+\theta}^t \eta^T(s)(I_N \otimes P)\eta(s) ds d\theta \quad (7)$$

显然 $V(t)$ 是一个正定函数

$$\dot{V}(t) = \dot{\eta}^T(t)(I_N \otimes P)\eta(t) + \eta^T(t)(I_N \otimes P)\dot{\eta}(t) + \tau \eta^T(t)(I_N \otimes P)\dot{\eta}(t) - \int_{t-\tau}^t \eta^T(s)(I_N \otimes P)\eta(s) ds \quad (8)$$

将式 (5) 代入, 得

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) = & ((I_N \otimes A)\eta(t) - (L \otimes B)\eta(t-\tau))^T (I_N \otimes P)\eta(t) + \\ & \eta^T(t)(I_N \otimes P)((I_N \otimes A)\eta(t) - (L \otimes B)\eta(t-\tau)) + \\ & \tau((I_N \otimes A)\eta(t) - (L \otimes B)\eta(t-\tau))^T (I_N \otimes P) \\ & ((I_N \otimes A)\eta(t) - (L \otimes B)\eta(t-\tau)) - \\ & \int_{t-\tau}^t \eta^T(s)(I_N \otimes P)\eta(s) ds = \\ & \eta^T(t)(I_N \otimes (A^T P + P A + \tau A^T A))\eta(t) - \\ & \eta^T(t)(L \otimes (P B + \tau A^T P B))\eta(t-\tau) - \\ & \eta^T(t-\tau)(L^T \otimes (B^T P + \tau B^T P A))\eta(t) + \\ & \eta^T(t-\tau)(L^T L \otimes \tau B^T P B)\eta(t-\tau) - \\ & \int_{t-\tau}^t \eta^T(s)(I_N \otimes P)\eta(s) ds = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\tau} \int_{t-\tau}^t \eta^T(s) (I_N \otimes (A^T P + PA + \tau A^T PA)) \eta(s) ds - \\ & \frac{1}{\tau} \int_{t-\tau}^t \eta^T(s) (L \otimes (PB + \tau A^T PB)) \eta(s-\tau) ds - \\ & \frac{1}{\tau} \int_{t-\tau}^t \eta^T(s-\tau) (L^T \otimes (B^T P + \tau B^T PA)) \eta(s) ds + \\ & \frac{1}{\tau} \int_{t-\tau}^t \eta^T(s-\tau) (L^T L \otimes \tau B^T PB) \eta(s-\tau) ds - \\ & \frac{1}{\tau} \int_{t-\tau}^t \tau \dot{\eta}^T(s) (I_N \otimes P) \dot{\eta}(s) ds \end{aligned} \quad (9)$$

取 $\psi(t) = [\eta^T(t-\tau) \quad \eta^T(t-\tau) \quad \dot{\eta}^T(s)]^T$, 则有

$$\dot{V}(t) = \frac{1}{\tau} \int_{t-\tau}^t \psi^T(s) r \psi(s) ds \quad (10)$$

其中

$$r = \begin{bmatrix} L^T L \otimes \tau B^T PB & -L^T \otimes (B^T P + \tau B^T PA) & \mathbf{0} \\ -L \otimes (PB + \tau A^T PB) & I_N \otimes (A^T P + PA + \tau A^T PA) & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & -\tau I_N \otimes P \end{bmatrix}$$

显然, 对于任意的 $\psi(t) \in \mathbb{R}^{3N \times 1}$, $\dot{V}(\psi(t); \psi(t_0), 0) \neq 0$ 。当 $\psi(t) \rightarrow \infty$, $\dot{V}(t) \rightarrow \infty$, 根据定理 1 可知当且仅当 $\dot{V}(t) \leq 0$, 无人机编队系统渐近稳定, 由 $\dot{V}(t) \leq 0$ 可得 $\psi \leq 0$ 。

根据引理 2, 可知当

$$\begin{bmatrix} \tau B^T PB & -(B^T P + \tau B^T PA) \\ -(PB + \tau A^T PB) & A^T P + PA + \tau A^T A \end{bmatrix} \leq 0$$

成立时, 有 $r \leq 0$ 。

从上述推导过程可以看出, 本文设计的 Lyapunov-Krasovskii 方程使得最后得到的线性矩阵不等式不再含有 Kronecker 乘积项, 无论多无人机编队系统内的无人机数量如何增加都不会增加矩阵不等式的求解难度, 使得计算时间大大简化, 有利于实现多无人机编队控制的实时性。

3 仿真实验

本节对前文算法进行仿真实验, 考虑一个包括 4 个无人机编队系统, 在二维平面空间进行时变编队运动, 编队中无人机初始位置、速度如表 1 所示。

表 1 飞行器初始状态

Table 1 Initial states of flight vehicles

飞行器 编号	位置与速度参数			
	x/m	y/m	$v_{x0}/(m \cdot s^{-1})$	$v_{y0}/(m \cdot s^{-1})$
1	3	5	0	0
2	-2	2	0	0
3	0	7	0	0
4	5	4	0	0

飞行器编队之间的通信拓扑图如图 2 所示。

时变编队设定为

$$h_i(t) = \begin{bmatrix} 3 \sin(0.2t + (i-1)/2) \\ 0.5 \cos(0.2t + (i-1)/2) \\ 8 \cos(0.5t + (i-1)/2) \\ -4 \sin(0.5t + (i-1)/2) \end{bmatrix} \quad i = 1, 2, 3, 4$$

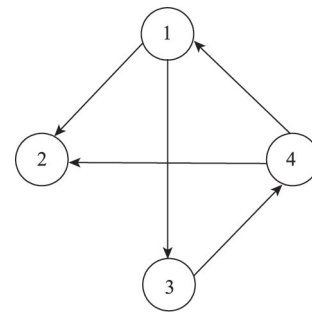


图 2 通信拓扑

Fig. 2 Communication topology

参考文献[38]和文献[39]的方法, 可以得到多无人机编队在不存在通信延迟下的控制协议一组可行参数为 $k_1=k_3=1.18$, $k_2=k_4=3.54$, 通过求解式(6)可以得到系统所允许的最大时延 $\tau=0.38$ s, 当时延 $\tau=0.38$ s 时, 利用 matlab 平台进行控制系统仿真可得多无人机编队的 x 方向位置跟踪误差、多无人机编队的 x 方向速度变化曲线和 10 s 时刻多无人机编队系统位置分布分别如图 3~图 5 所示。

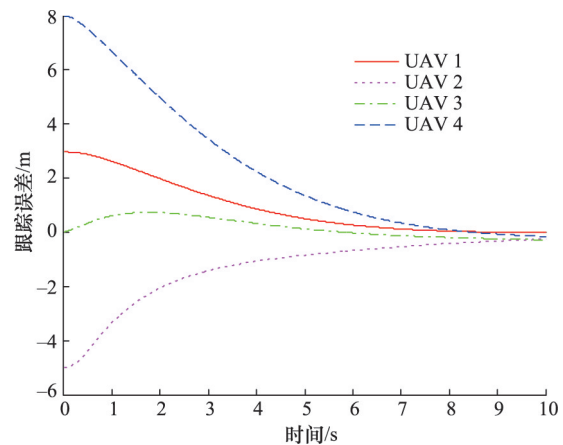


图 3 多无人机编队的 x 方向位置跟踪误差

Fig. 3 x direction position tracking errors of multiple UAV formation

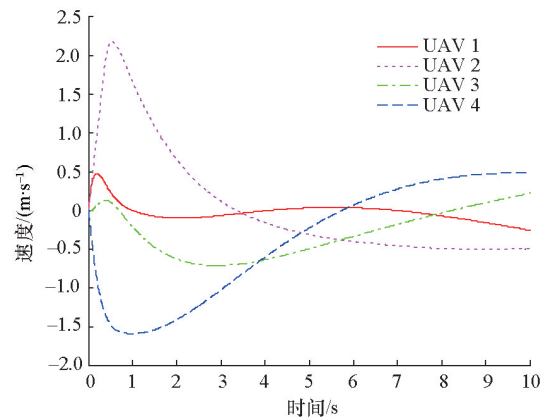


图 4 多无人机编队的 x 方向速度变化曲线

Fig. 4 x direction speed curves of UAV formation

由图3可以看出,多无人机编队在 x 方向(东向)与时变编队位置跟踪误差随时间趋向于0。由图4可以看出8 s后多无人机编队在 x 方向(东向)的速度呈余弦规律交替变化,其最大幅值为0.5,也完成了与时变编队速度的跟踪。其在 y 方向(北向)具有相似的变化规律。图5所示为多无人机编队在10 s时刻的位置,从图中可以看出当无人机运动10 s后形成了一个平行四边形的编队队形。由以上3点可知,多无人机编队能够实现与时变编队位置与速度的跟踪控制。

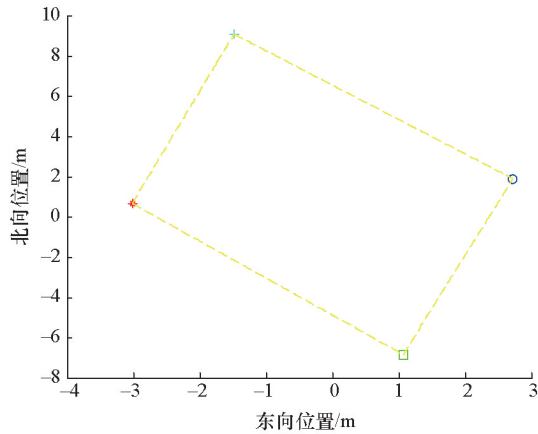


图5 10 s时刻多无人机编队系统位置分布

Fig. 5 Position trajectory of UAV formation system

4 结论

本文研究了通信拓扑为有向图且存在通信时延条件下的多无人机系统的时变编队飞行控制问题,通过设计基于一致性理论的编队控制器将多无人机编队的控制问题转化为求解矩阵不等式的问题,具体结论如下。

1) 控制器参数可以通过求解线性矩阵不等式得到,相比一般不存在通信时延的一致性问题的求解,线性矩阵不等式需要增加一个和通信时延有关的附加项,当通信时延小于一定值时,本文所设计的控制器能够实现多无人机编队系统时变编队跟踪控制。

2) 通过设计特殊的Lyapunov-Krasovskii方程使得文中线性矩阵不等式求解的计算量大大降低,线性矩阵不等式的求解复杂度不会随着多无人机编队系统内无人机数量的增加而增加。

参考文献(References)

[1] He R, Bachrach A, Achtelik M, et al. On the design and use of a micro air vehicle to track and avoid adversaries[J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2010, 29: 529-546.

[2] Campoy P, Correa J F, Mondragón I, et al. Computer vision onboard UAVs for civilian tasks[J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2009, 54(1): 105-135.

[3] Johnson E N, Calise A J, Watanabe Y, et al. Real-time vision-based relative aircraft navigation[J]. *Journal of Aerospace Computing Information & Communication*, 2012, 4(4): 707-738.

[4] Cetin O, Zagli I, Yilmaz G. Establishing obstacle and collision free com-

munication relay for UAVs with artificial potential fields[J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2013, 69(1): 361-372.

[5] Park C, Cho N, Lee K, et al. Formation flight of multiple UAVs via on-board sensor information sharing[J]. *Sensors*, 2015, 15(7):17397.

[6] Avellar G S C, Pereira G A S, Pimenta L C A, et al. Multi-UAV routing for area coverage and remote sensing with minimum time[J]. *Sensors*, 2015, 15(11): 27783-27803.

[7] 闫海波, 刘源, 王仕成, 等. 多个体协调控制问题综述[J]. *自动化学报*, 2012, 38(10): 1557-1569.

Yan Haibo, Liu Yuan, Wang Shicheng, et al. AN overview on coordination problem of multi-agent system[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2012, 38(10): 1557-1569.

[8] 张汝波, 姜丽梅, 刘佰龙. 具有时延的编队控制系统稳定性分析方法[J]. *西南交通大学学报*, 2011, 46(5):770-778.

Zhang Rubo, Jiang Limei, Liu Bailong. Review of Stability Analyses of Formation Control with Time Delay[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2011, 46(5): 770-778.

[9] Cao M, Morse A S, Anderson B D O. Reaching an agreement using delayed information[C]//*Proceedings of 45th Conference on Decision and Control(CDC)*. San Diego: IEEE, 2006: 3375-3380.

[10] Xiao F, Wang L. Asynchronous consensus in continuous-time multi-agent systems with switching topology and time-varying delays[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2008, 53(8): 1804-1816.

[11] Wang L, Xiao F. A new approach to consensus problems in discrete-time multiagent systems with time-delays[J]. *Science China Information Sciences*, 2007, 50(4): 625-635.

[12] Liu D J, Liu C L. Consensus Problem of Discrete-time Second-order Multi-agent Network with Communication Delays[C]//*International Symposium on Intelligent Information Technology Application*. New York: IEEE, 2009: 340-344.

[13] Olfati-Saber R, Murray R M. Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2004, 49(9): 1520-1533.

[14] Yang W, Bertozzi A L, Wang X. Stability of a second order consensus algorithm with time delay[C]//*Decision and Control*, 2008. Cdc 2008. IEEE Conference on. New York: IEEE, 2008: 2926-2931.

[15] Tian Y P, Liu C L. Consensus of multi-agent systems with diverse input and communication delays[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2008, 53(9): 2122-2128.

[16] Münz U. Delay robustness in cooperative control[M]. Berlin: Logos Verlag Berlin, 2010.

[17] 丁丹丹. 不同延时的二阶多智能体系统的编队协调控制[J]. *计算机技术与发展*. 2012, 22(8): 67-71.

Ding Dandan. Formation coordination control of second-order multi-agent systems with heterogeneous delays[J]. *Computer Technology and Development*, 2012, 22(8): 67-71.

[18] 朱旭, 闫建国, 屈耀红. 不同延迟下离散多智能体系统的一致性[J]. *电子与信息学报*. 2012, 34(6): 1516-1521.

Zhu Xu, Yan Jianguo, Qu Yaohong. Consensus for the discrete-time multi-agent system with diverse delays[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(6): 1516-1521.

[19] 纪良浩, 廖晓峰. 具有不同延时的多智能体系统一致性分析[J]. *物理学报*, 2012, 61(15):8-16.

Ji Lianghao, Liao Xiaofeng. Consensus analysis of multi-agent system with multiple time delays[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(15): 8-16.

[20] 杨洪勇, 田生文, 张嗣瀛. 具有领航者的时延多智能体系统的一致性[J]. *电子学报*, 2011, 39(4):872-876.

Yang Hongyong, Tian Shengwen, Zhang Siying. Consensus of multi-agent systems with heterogeneous delays and leader-following[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2011, 39(4): 872-876.

[21] 姜丽梅, 张汝波. 具有通信时延的多机器人编队控制[J]. *北京邮电大*

- 学学报, 2012, 35(2): 54-58.
- Jiang Limei, Zhang Rubo. Multi-Robot Formation with Communication Delay[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2012, 35(2): 54-58.
- [22] Lin P, Jia Y. Consensus of a class of second-order multi-agent systems with time-delay and jointly-connected topologies[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2010, 55(3): 778-784.
- [23] Münz U, Papachristodoulou A, Allgöwer F. Nonlinear multi-agent system consensus with time-varying delays[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2008, 41(2): 1522-1527.
- [24] Moreau L. Stability of multiagent systems with time-dependent communication links[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2005, 50(2): 169-182.
- [25] 王青, 后德龙, 李君, 等. 存在时延和拓扑不确定的多弹分散化协同制导时间一致性分析[J]. 兵工学报, 2014, 35(7): 982-990.
Wang Qing, Hou Delong, Li Jun, et al. Consensus analysis of multi-missile decentralized cooperative guidance time with time-delays and topologies uncertainty[J]. Acta Armamentarii, 2014, 35(7): 982-990.
- [26] 杨亚桥, 吴晓峰, 林茜. 多智能体离散时间一致性跟踪研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2011, 39(10): 69-72.
Yang Yaqiao, Wu Xiaofeng, Lin Qian. Discrete-time Consensus Tracking in Multi-agent Systems[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2011, 39(10): 69-72.
- [27] 胡庆雷, 张健, 马广富. 含时变时延的卫星编队姿态协同自适应滑模 L_2 增益控制[J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(11): 2356-2362.
Hu Qinglei, Zhang Jian, Ma Guangfu. L_2 - gain based adaptive sliding mode coordinated attitude control of satellite formation with time-varying delays[J]. Systems Engineering and Electronics, 2013, 35(11): 2356-2362.
- [28] 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(增刊1): 151-155.
Ding Yan, Wei Chen, Bao Shuyu. Formation control for multiple uavs with time delay based on consensus algorithm[J]. Journal of Computer Applications, 2014, 34(Suppl 1): 151-155.
- [29] 孙凤兰, 关治洪. 具有变通信时延的多智能体系统的平均一致性[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2011, 39(7): 71-76.
Sun Fenglan, Guan Zhihong. Average Consensus of Multi-agent Systems with Variable Communication Delays[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2011, 39(7): 71-76.
- [30] 谢媛艳, 王毅, 马忠军. 领导-跟随多智能体系统的滞后一致性[J]. 物理学报, 2014, 63(4): 13-17.
Xie Yuanyan, Wang Yi, Ma Zhongjun. Delay Consensus of Leader-following Multi-agent Systems[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(4): 13-17..
- [31] Secchi C, Fantuzzi C. Formation control over delayed communication networks[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. New York: IEEE, 2008: 563-568.
- [32] 孙海波, 周锐, 邹丽, 等. 通信和测量受限条件下异构多UAV分布式协同目标跟踪方法[J]. 航空学报, 2011, 32(2): 299-310.
Sun Haiibo, Zhou Rui, Zou Li. Distributed cooperation target tracking for heterogeneous multi-UAV under communication and measurement constraints[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(2): 299-310.
- [33] 魏瑞轩, 茹常剑, 祁晓明. 通信延迟条件下无人机编队重构的自主安全控制[J]. 控制理论与应用, 2013, 30(9): 1099-1108.
Wei Ruixuan, Ru Changjian, Qi Xiaoming. Autonomous safety control of unmanned aerial vehicle formation reconfiguration under communication delay[J]. Control Theory & Applications, 2013, 30(9): 1099-1108.
- [34] Sun H Q. Graph theory and its application[M]. Beijing: Science Press, 2004: 25-28.
- [35] Zhou S L, Qi Y H, Kang Y H, et al. H_∞ consensus control of multi-agent systems synthesised with transient performance in directed networks[J]. Engineering Optimization, 2016, 34(3): 2053-2059.
- [36] Zhou S L, Qi Y H, Zhang L, et al. Time-varying formation control of UAV swarm systems with switching topologies[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 35(3): 1-10.
- [37] Boyd S, Ghaoui L E, Feron E, et al. Linear matrix inequality in system and control theory//SLAM studies in applied mathematics[J]. Philadelphia: SIAM, 1994, 14(5): 31-36.
- [38] Hu S H. Automatic control theory [M]. 5th ed. Beijing: Science Press, 2007.
- [39] Zhou Y, Dong X, Lu G, et al. Time-varying formation control for unmanned aerial vehicles with switching interaction topologies[C]//International Conference on Unmanned Aircraft Systems. Orlando: IEEE, 2014: 1203-1209.
- [40] Dong X, Yu B, Shi Z, et al. Time-varying formation control for unmanned aerial vehicles: Theories and applications[J]. Control Systems Technology IEEE Transactions on, 2014, 23(1): 340-348.
- [41] Seo J, Kim Y, Kim S, et al. Consensus-based reconfigurable controller design for unmanned aerial vehicle formation flight[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part G Journal of Aerospace Engineering, 2012, 226(7): 817-829.
- [42] Liu W, Liu A L, Zhou S L. Distributed H_∞ control of multi-agent systems with directed networks[J]. Chinese Physics B, 2015, 24(9): 090208.

Formation control of multiple UAVs with communication delays

ZHOU Shaolei, KANG Yuhang, GUO Zhiqiang, LI Songlin, QI Yahui

Department of Control Engineering, Naval Aeronautical and Engineering University, Yantai 264001, China

Abstract This paper proposes a formation control algorithm based on the consensus theory for a multi-agent system model of second-order dynamic characteristic in the case of communication delay and time-varying formation configuration. Firstly, the time-varying formation control problem is transformed into an asymptotically stable problem of the closed-loop system. Secondly, a Lyapunov-Krasovskii function is constructed and a sufficient condition for the stability of multi-agent formation system is given in terms of linear matrix inequality (LMI). Finally, simulation is carried out with the multi-agent system being regarded as a mass point. Results show that when the communication delay and control protocol parameters meet the stability condition, the proposed formation control algorithm can produce a desired time-varying formation.

Keywords time delay; unmanned aerial vehicle; time-varying formation; linear matrix inequality

(责任编辑 刘志远)