

# 具有通信时延和拓扑时变的多无人机姿态同步控制

余亮<sup>a</sup>, 林达<sup>b</sup>, 任斌<sup>a</sup>, 唐余<sup>a</sup>

(四川理工学院 a. 自动化与信息工程学院; b. 物理与电子信息工程学院, 四川 自贡 643000)

**摘要:**针对具有二阶动力学特性的多无人机系统模型,研究了多无人机(multi-UAVs)系统在通信时延和通信拓扑结构为无向时变情况下的姿态同步问题。通过对姿态同步的一致性条件分析,将一种针对多个一般非线性系统的基于输出反馈的协同控制方法应用在采用四元数法描述的空间多个刚体姿态的协同控制系统中去,并利用姿态动力学及 Lyapunov-Krasovskii 泛函对该控制方案进行了理论证明。数值仿真结果表明,当通信时延、通信拓扑结构等参数随机切换时,该姿态同步控制算法能有效地保证每个飞行器在编队中能够与其他飞行器保持姿态同步的同时,还能够在有限时间内达到期望的时变姿态以及角速度。

**关键词:**多无人机;通信时延;拓扑时变;姿态同步

**中图分类号:**TP13

**文献标志码:**A

## 引言

近年来,多智能体一致性理论成为控制理论界十分活跃的一个研究方向,多智能体相比于单个智能体行动而言有着更好的灵活性、适应性、执行能力等优点。同时,对多智能体一致性协议与协同控制的研究也直接为多飞行器群体、航空母舰编队、卫星协同控制等问题提供了指导思想<sup>[1]</sup>。

同时,多智体系统一致性理论作为智能体之间协同控制的基础,得到了快速发展。所谓一致性是指多智能体在网络环境下通过感知测量周围成员的信息并彼此交换,在各个智能体上分布式的产生某种算法或协议,使得这些智能体在相互协同的问题上达成一致,从而协

同地完成共同的任务<sup>[2]</sup>。针对一致性问题,有两个问题是不可避免的:一是在多智能体系统中,任意两个智能体之间存在通信时延是肯定存在的,文献[3-5]中介绍了解决通信时延的一致性算法,并将其应用于多无人机协同控制系统中,但在实际应用中这些假定均不能得到有效的满足,如通信的延时并不能被限定为连续的;另一问题是在协同控制过程中通信拓扑结构发生改变后如何确保相互之间的信息能够得到及时的交换而不受影响<sup>[6]</sup>。因此,研究在拓扑结构发生改变和存在通信时延的情况下处理好相互之间的信息交流就显得很有现实意义<sup>[7]</sup>。

无人机协同编队离不开相互间的信息沟通,而在编队中的通信常会受到恶劣的天气、电磁干扰、通信设备

收稿日期:2018-06-05

基金项目:国家自然科学基金(61640223);中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室开放基金(20160106);四川省自然科学基金(2016JY0179);人工智能四川省重点实验室基础研究重点项目(2016RZJ02)

作者简介:余亮(1994-),男,四川资阳人,硕士生,主要从事多无人机智能协同控制方面的研究,(E-mail)1403847@qq.com

故障等因素的干扰而造成通信延时<sup>[8]</sup>,甚至造成通信链路中断。文献[9]分析了通信距离限制、通信角度限制、通信时间延迟等对编队的影响,利用状态估计的无人机状态信息补偿方法来消除通信延时的影响。文献[10]针对固定通信拓扑下具有时变时延的多无人机系统同步的问题,利用 Lyapunov-Krasovskii 函数分析了时延多无人机系统的稳定性,提出了一种基于一致性协议的分布式编队控制算法。文献[11]选取包含位置跟踪误差和速度跟踪误差的辅助变量,提出了一种适用于时变通信延迟的鲁棒自适应编队控制策略。

在无人机编队执行任务的过程中,可能会因地地理位置或敌人攻击等因素而改变编队形式。文献[12]针对具有切换互联拓扑的无人机群的时变编队控制问题,提出了具有双环结构的控制方案,即内环控制器控制姿态,外环控制器驱使无人机飞向期望的位置。文献[13]中针对在不确定的通信时延和随机切换通信拓扑结构情况下,通过引入状态向量和状态空间转化将多无人机群系统转化为两个解耦子系统,基于解耦的子系统,得到了收敛的充分条件。

本文在已有的基础上,研究了多无人机系统在时变通信时延和随机切换通信拓扑的情况下姿态同步的问题,并在一致性理论的基础上构造了类 Lyapunov-Krasovskii 泛函方程,推导出了系统达到稳定时的充分条件,设计了控制扭矩。最后通过仿真验证了该控制算法的有效性和鲁棒性。

## 1 预备知识

### 1.1 无人机姿态动力学模型

参考文献[14],本文采用四元数表示无人机的动力学模型。定义单位四元数  $Q = (q \ \eta)^T \in R^4$ ,  $|Q| = 1$ ; 且单位四元组满足约束条件  $QQ^T = 1$ 。

单位四元数通常也认为是一种轴角表示法,即绕任意单位长度向量  $\hat{\kappa} \in R^3$  旋转一个角度  $\theta$  的操作,可用如下单位四元数描述:

$$Q = (\hat{\kappa} \sin(\theta/2) \quad \cos(\theta/2))^T$$

式中:  $\hat{\kappa} = [\hat{\kappa}_1 \ \hat{\kappa}_2 \ \hat{\kappa}_3]^T$ , 是一个单位矢量在旋转方向上的坐标,称为欧拉轴;  $\theta$  是关于  $\hat{\kappa}$  的旋转角,称为欧拉

角。

定义两个单位四元数  $Q_1$  和  $Q_2$  的乘积为  $Q_1 Q_2 = \begin{bmatrix} \eta_1 \eta_2 + q_1^T q_2 \\ \eta_1 q_2 - q_1^T \eta_2 \end{bmatrix}$ , 且两者的乘积仍为一个单位四元数。其中  $S(x)$  是与  $x = (x_1 \ x_2 \ x_3)^T \in R^3$  相关的斜

$$\text{对称矩阵,表示为: } S(x) = \begin{pmatrix} 0 & -x_3 & x_2 \\ x_3 & 0 & -x_1 \\ -x_2 & x_1 & 0 \end{pmatrix}.$$

图1给出了四旋翼飞行器模型的架构,其中  $\theta, \varphi, \psi$  分别表示俯仰、滚转、偏航角。这种常见的四旋翼无人机通过增加或降低四个发动机的旋转速度来实现沿  $z$  轴的推力,实现无人机的爬升或降低。滚转运动通过增加旋翼2的推力,减小旋翼4的推力来控制,以此来得到一个向右的滚转;俯仰运动则是通过旋翼1和旋翼3之间不同的速度来实现的;偏航运动则通过调整顺时针和逆时针旋转旋翼的平均推力来实现。比如:差动地改变旋翼1、3和旋翼2、4的推力,由于旋翼空气阻力和反扭力,将产生围绕机体  $Z$  轴的力矩,引起偏航运动。

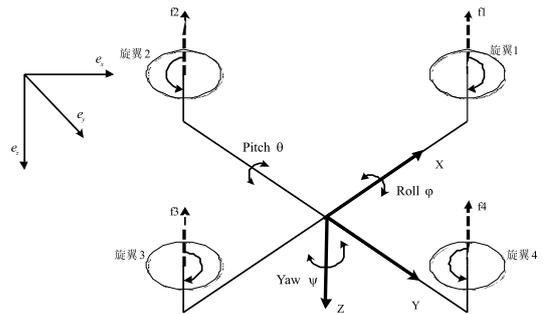


图1 四旋翼飞行器模型的架构示意图

在本文中,多无人机系统中第  $i$  架无人机的动力学模型如下:

$$\begin{cases} \dot{Q}_i = \frac{1}{2} T(Q_i) w_i \\ J_i \dot{w}_i = \Gamma_i - S(w_i) J_i w \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $Q$  是表示机体坐标系的方向的单位四元数;  $w$  是飞行器的机体参考角速度;  $T(Q)$  由下式给出:  $T(Q) = \begin{pmatrix} \eta I_3 + S(q) \\ -q^T \end{pmatrix}$ ;  $\Gamma$  表示作用于飞行器上的输入扭矩。

根据文献[15],在存在通信时延的情况下可用单位

四元数  $\bar{Q}_{ij} = (\bar{q}_{ij}^T \ \bar{\eta}_{ij})^T$  表示任意对通信系统间的相对姿态,  $\bar{Q}_{ij}$  定义如下:

$$\bar{Q}_{ij} = Q_j^{-1}(t - \tau_{ij}) \odot Q_i$$

式中:  $Q_i$  为第  $i$  个刚体方向的单位四元素;  $Q_j(t - \tau_{ij})$  为第  $j$  个刚体接收到的绝对姿态;  $\tau_{ij}$  为时变通信时延。

### 1.2 通信拓扑

为实现无人机群的编队或姿态同步,就必须根据各无人机之间相互交换信息来设计控制方案,因此,无人机群之间的通信对控制器的设计至关重要。一般来说,多无人机系统中信息交互可用无向图和有向图两种方法来描述。在本文中,采用无向加权图  $G$  来表示无人机之间的通信结构。 $G$  由三元组  $(N, F, K)$  构成,其中:  $N = \{1, \dots, n\}$  表示节点,用于描述群中飞行器集合;  $F$  是成对节点的集合,也称为边,边  $(i, j) \in F$  表示第  $i$  个系统接收来自第  $j$  个系统的信息,且两者相邻;  $K = [k_{ij}] \in R^{n \times n}$  是加权邻接矩阵,其定义为:当且仅当  $(i, j) \in F$  时,  $k_{ij} > 0$ ; 当  $(i, j) \notin F$  时,  $k_{ij} = 0$ ; 同时,  $k_{ii} = 0$ 。用  $G_n = \{G_1, G_2, \dots, G_p\}$ ,  $p \geq 1$  来表示无人机通信系统间可能存在的通信拓扑图合集。

**定义 1** 如果由  $n$  架无人机组成的无人机群,当  $t \rightarrow \infty$  时,  $\|q_{ij}(t)\| \rightarrow 0$ ,  $\|w_{ij}(t)\| \rightarrow 0$ , 则称该  $n$  架无人机达成姿态同步或一致。

**引理 1**<sup>[15]</sup> 考虑由  $n$  架无人机组成的群,群中各无人机之间的通信根据无向加权图  $G$  互连,若满足下列方程:

$$\sum_{j=1}^n k_{ij} q_{ij} = 0, \quad i \in N$$

那么,  $q_{ij} = 0$  是上式的唯一解。

### 1.3 评价指标

为清晰地阐释该姿态协同算法在实现姿态同步受通信时延影响的同时能继续保持,可引入如下的姿态保持性能指标:

$$\begin{aligned} \sigma_1 = & \|q_1 - q_2\| - \|q_1 - q_4\| + \\ & \|q_1 - q_2\| - \|q_2 - q_3\| + \\ & \|q_2 - q_3\| - \|q_3 - q_4\| + \\ & \|q_1 - q_3\| - \|q_2 - q_4\| \end{aligned}$$

在暂态过程中,  $\sigma_1$  的数值越小,表示该算法的性能越好。同样地,再引入姿态一致性性能指标:

$$\sigma_2 = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n \sqrt{(\bar{q}_{ij} - 1)^2 + \hat{q}_{ij}^T \hat{q}_{ij}}$$

同样,在暂态过程中,  $\sigma_2$  的数值越小,表明多无人机之间相对姿态保持即姿态一致性性能好。

## 2 姿态同步控制器设计

考虑由  $n$  架无人机组成的编队,多无人机之间的通信用无向加权图  $G$  表示。针对式(1)表示的无人机的动力学模型,本文主要研究存在通信时变时延并切换通信拓扑的情况下,多无人机系统姿态同步的问题。参考文献[2]设计第  $i$  架无人机控制输入为:

$$\Gamma_i = -k_i^w w_i - \sum_{j=1}^n k_{ij} \bar{q}_{ij} \quad (2)$$

式中:  $k_i^w$  是严格正的标量增益;  $\bar{q}_{ij}$  是单位四元数  $\bar{Q}_{ij}$  的向量部分;  $k_{ij} \geq 0$ , 是无向图  $G$  邻接矩阵的第  $(i, j)$  个元素。

**引理 2**<sup>[16]</sup> 考虑式  $Q_{ij} = Q_j^{-1} \odot Q_i$  和式  $\bar{Q}_{ij} = Q_j^{-1}(t - \tau_{ij}) \odot Q_i$  所定义的相对姿态,那么下面不等式对任意严格正常数  $\varepsilon$  都成立:

$$(\bar{q}_{ij} - q_{ij})^T w_i \leq \varepsilon Q_i^T Q_i + \frac{\tau_{ij}}{\varepsilon} \int_{t-\tau_{ij}}^t Q_j^T Q_j ds$$

其中:  $\tau_{ij}$  为时变时延。

**引理 3 (Barbalat 引理)**<sup>[16]</sup> 若  $y$  是区间  $[0, \infty)$  上的一致连续函数,如果  $\lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^t y(s) ds$  存在且有限,那么当  $t \rightarrow \infty$  时,  $y(t) \rightarrow 0$ 。

**引理 4 (扩展 Barbalat 引理)**<sup>[15]</sup> 令  $x(t)$  是微分方程  $\dot{x}(t) = a(t) + b(t)$  的一个解,其中  $a(t)$  是一个一致连续函数。如果当  $t \rightarrow \infty$  时,  $x(t) \rightarrow c$ ,  $b(t) \rightarrow 0$ , 其中  $c$  是一个常数,则当  $t \rightarrow \infty$  时,  $\dot{x}(t) \rightarrow 0$ 。

**定理 1** 考虑无人机模型(1)和控制输入(2),在假设通信时延  $\tau_{ij}$  有界的情况下,即对于所有  $(i, j) \in F$  有  $\tau_{ij} \geq \tau$ , 其中  $\tau$  是一正常数,若  $\varepsilon > 0$ , 令控制器增益满足:

$$k_i^z = k_i^w - \sum_{j=1}^n \frac{k_{ij}}{4} \left( \varepsilon + \frac{\tau^2}{\varepsilon} \right) > 0$$

可得到所有信号全局有界,即  $w_i \rightarrow 0$ 。那么,存在一个时刻  $t_0 > 0$ , 使得对于所有  $t \geq t_0, i \in N$ , 有  $\|q_{ij}(t)\| \rightarrow 0$ 。

**证明** 利用式(1)和式(2), 闭环动力学方程可以写为:

$$J_i \dot{w}_i = -S(w_i)J_i w_i - k_i^w w_i - \sum_{j=1}^n k_{ij} \bar{q}_{ij} \quad (3)$$

考虑下面的 Lyapunov-Krasovskii 泛函:

$$V = \sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{2} w_i^T J_i w_i + \sum_{j=1}^n k_{ij} (1 - \eta_{ij}) \right) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{k_{ij} \tau}{\varepsilon} \int_{-\tau}^0 \int_{t+s}^t Q_j^T(\rho) Q_j(\rho) d\rho ds \quad (4)$$

式中:  $\varepsilon > 0, \tau_{ij} < \tau, \tau$  为正常数,  $\eta_{ij}$  为  $Q_{ij}$  中的标量部分。

根据单位四元数的归一化约束, 可得到  $2(1 - \eta_{ij}) = (q_{ij}^T q_{ij} + (1 - \eta_{ij})^2)$ , 再根据闭环动力学方程(3)可计算并得到(4)中  $V$  关于时间的导数:

$$\dot{V} = \sum_{i=1}^n \left( -k_i^w w_i - \sum_{j=1}^n k_{ij} \bar{q}_{ij} \right) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n k_{ij} \left( \frac{1}{2} q_{ij}^T w_{ij} + \frac{\tau}{\varepsilon} (\tau Q_j^T Q_j - \int_{t-\tau}^t Q_j^T Q_j ds) \right)$$

利用无向图的对称性, 即  $k_{ij} = k_{ji}$ , 可以得到:

$$\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n k_{ij} w_{ij}^T q_{ij} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n k_{ij} w_i^T q_{ij}$$

根据引理 2 的结果, 可得到:

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n k_{ij} \left( \varepsilon Q_i^T Q_i + \frac{\tau_{ij}}{\varepsilon} \int_{t-\tau_{ij}}^t Q_j^T Q_j ds \right) + \\ & \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{k_{ij} \tau}{\varepsilon} \left( \tau Q_j^T Q_j - \int_{t-\tau}^t Q_j^T Q_j ds \right) - \\ & \sum_{i=1}^n w_i^T k_i^w w_i \end{aligned}$$

同理, 可以证明得到:

$$Q_i^T Q_i = \frac{1}{4} w_i^T T(Q_i)^T T(Q_i) w_i = \frac{1}{4} w_i^T w_i$$

且

$$\tau_{ij} \int_{t-\tau_{ij}}^t Q_j^T Q_j ds \leq \tau \int_{t-\tau}^t Q_j^T Q_j ds$$

利用无向通信图的对称性, 可得:

$$\dot{V} \leq - \sum_{i=1}^n k_i^z w_i^T w_i$$

式中:  $k_i^z$  在定理 1 中定义。因此,  $\dot{V}$  是负半定的。

借助扩展 Barbalat 引理, 即引理 4, 可推出  $\dot{w}_i \rightarrow 0, i \in N$ 。故式(3)可以重写为:

$$J_i \dot{w}_i = -S(w_i)J_i w_i - k_i^w w_i - \sum_{j=1}^n k_{ij} q_{ij} - \sum_{j=1}^n k_{ij} T^T(Q_i) \int_{t-\tau_{ij}}^t Q_j ds$$

由于  $w_i \rightarrow 0$ , 显然从式(1)中可以得到  $Q_i \rightarrow 0$ 。由于  $\tau_{ij}$  有界, 可推出  $\int_{t-\tau_{ij}}^t Q_j ds \rightarrow 0$ 。借助引理 4, 可以推出  $\dot{w}_i \rightarrow 0$ 。再结合上述结论, 可推出:  $\sum_{j=1}^n k_{ij} q_{ij} \rightarrow 0, i \in N$ , 进一步可得:  $q_{ij} \rightarrow 0, w_{ij} \rightarrow 0$ 。从而解决了姿态同步的问题, 证明完毕。

### 3 仿真及分析

为验证姿态协同控制器(2)在存在时变时延和通信拓扑结构时变的情况下的有效性, 考虑一个由 4 架同构无人机组成的系统, 对其进行相应的数值仿真, 仿真步长设置为 0.001 s。四架无人机的惯性矩阵参数见表 1, 无人机成员的初始状态参数见表 2。假定多无人机通信拓扑结构随机在图 2 中切换。其中, 群中成员的通信时延为  $\tau_{ij} = \bar{\tau}_{ij} |\sin(0.2t)|$  s, 其中  $\bar{\tau}_{1i} = 0.1$  s,  $\bar{\tau}_{2i} = 0.15$  s,  $\bar{\tau}_{3i} = \bar{\tau}_{4i} = 0.2$  s。采用控制扭矩(2)并进行数值仿真, 得到的结果如图 3~图 8 所示。图 3 显示了  $t$  时刻多无人机的通信拓扑类型  $\sigma(t)$ 。当  $\sigma(t) = 1$  时, 表示多无人机通信拓扑结构为  $G_1$ ; 同样, 当  $\sigma(t) = 2, 3, 4$  时, 分别表示多无人机通信拓扑结构为  $G_2, G_3, G_4$ ; 由此, 可根据图 3 确定出某个时刻下多无人机具体的通信拓扑结构图。

表 1 无人机惯性矩阵参数(单位: kg · m<sup>2</sup>)

短阵	参 数
$J_1$	[20,0,0;0,20,0;0,0,30]
$J_2$	[10,0,0;0,5,0;0,0,15]
$J_3$	[10,0,0;0,3,0;0,0,8]
$J_4$	[5,0,0;0,8,0;0,0,15]

表 2 无人机初始化状态

编号	初始姿态	初始角速度
1	[0 0 sin(-pi/4) cos(-pi/4)] <sup>T</sup>	[-0.1 0.09 0.1] <sup>T</sup>
2	[1 0 0 0] <sup>T</sup>	[0.2 -0.05 0.1] <sup>T</sup>
3	[0 1 0 0] <sup>T</sup>	[-0.2 0.1 -0.05] <sup>T</sup>
4	[0 0 1 0] <sup>T</sup>	[0.1 0.1 -0.25] <sup>T</sup>

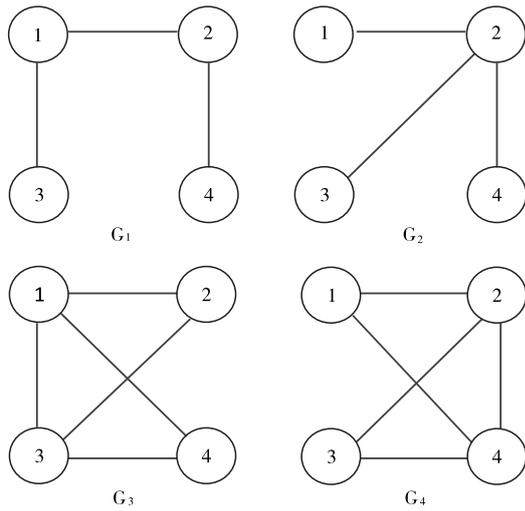


图 2 多无人机通信拓扑随机切换图

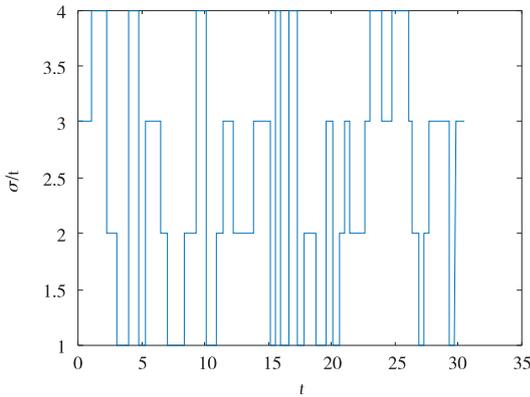


图 3  $t$  时刻多无人机的通信拓扑结构类型  $\sigma(t)$

图 4 ~ 图 6 分别绘出了 4 架无人机在控制扭矩 (2) 下的姿态、角速度和输入力矩情况。通过仿真图可以看出,在通信时延和切换通信拓扑结构情况下,系统不仅能达到稳态,而且能稳定保持。

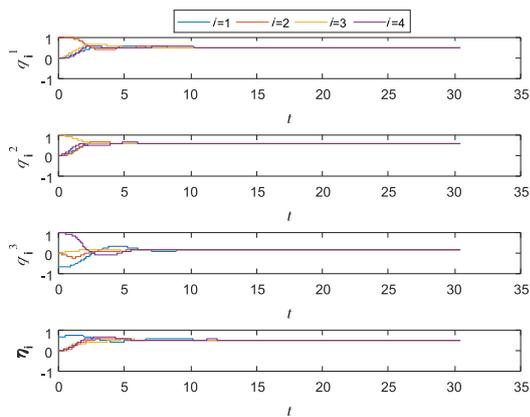


图 4 基于控制器 (2) 的多无人机姿态

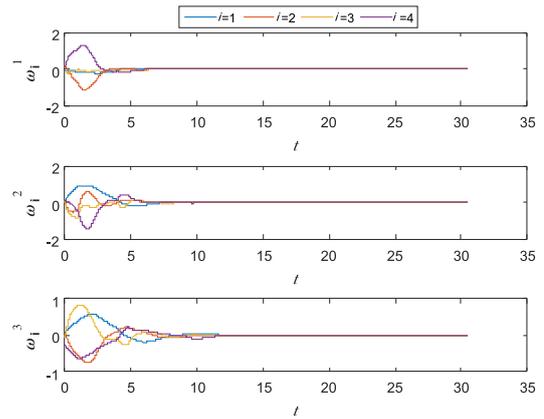


图 5 基于控制器 (2) 的多无人机角速度

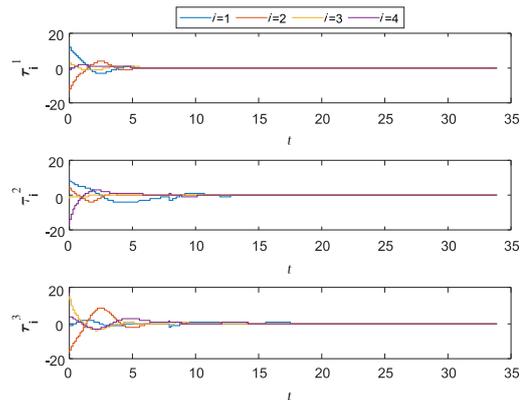


图 6 基于控制器 (2) 的多无人机控制扭矩

另外,由图 4 可以看出,四架无人机的姿态误差四元数分量都收敛到了零附近,且在动态响应过程中姿态一致性得到了一定程度上的保持。同样,图 5 显示的角速度误差四元数分量也全部达到了同步。

通过仿真图可以看出多无人机的姿态误差和角速度误差均在 5 s 左右收敛于零,达到稳态以后在切换通信拓扑结构和存在通信时延的情况下,其姿态和角速度的误差仍能保持较小的值。表明了该算法有一定的鲁棒性。

图 7 和图 8 分别描述了姿态保持性能和相对姿态保持性能。在 15 s 后  $\sigma_1$  收敛到了零附近,说明在动态响应过程中姿态的一致性在一定的程度上得到了保持。同样,图 7 中的相对姿态保持性能在各无人机姿态同步后,  $\sigma_2$  的值也收敛在零附近,说明相对姿态保持性能较好。 $\sigma_1$  和  $\sigma_2$  在前 15 s 内值较大,是由于在此段时间内切换通信拓扑和通信时延造成的。

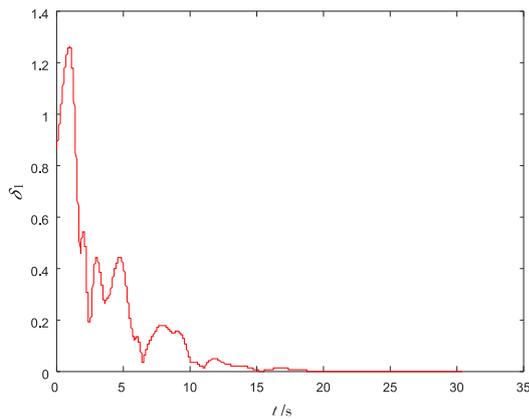


图7 姿态保持性能曲线

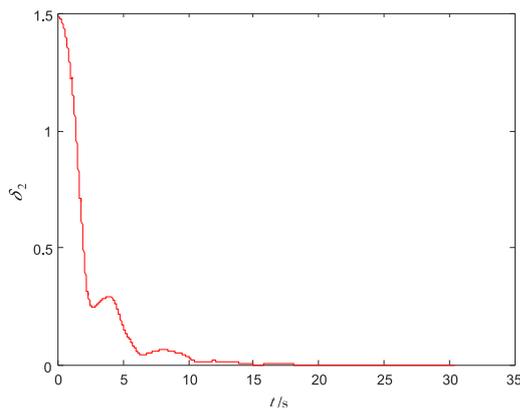


图8 相对姿态保持性能曲线

#### 4 结束语

本文在基于一致性理论和代数图论的基础上研究了在存在通信时延和通信拓扑时变情况下多无人机姿态同步的问题,设计了相应的控制器,并在理论上证明了控制器在该情况下的有效性。相较于其他算法,本文所给出的控制算法在通信时延下随机切换通信拓扑时仍可达到姿态同步,仿真结果也表明该算法在这种情况下有较好的鲁棒性。

#### 参考文献:

[1] LIU Y, MIN H, WANG S, et al. Distributed adaptive consensus for multiple mechanical systems with switching topologies and time-varying delay[J]. *Systems & Control Letters*, 2014, 64(1): 119-126.

[2] 任伟, 比尔德. 多飞行器协同控制中的分布式一致性: 理论与应用[M]. 吴晓锋, 译. 北京: 电子工业出版社, 2014.

社, 2014.

- [3] MENG Z, REN W, CAO Y, et al. Leaderless and leader-following consensus with communication and input delays under a directed network topology[J]. *IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics Part B Cybernetics A Publication of the IEEE Systems Man & Cybernetics Society*, 2011, 41(1): 75-88.
- [4] MüNZ U, PAPACHRISTODOULOU A, ALLGÖWER F. Delay robustness in consensus problems[J]. *Automatica*, 2010, 46(8): 1252-1265.
- [5] TIAN Y P, LIU C L. Robust consensus of multi-agent systems with diverse input delays and asymmetric interconnection perturbations[J]. *Automatica*, 2009, 45(5): 1347-1353.
- [6] DONG X, ZHOU Y, REN Z, et al. Time-varying formation control for unmanned aerial vehicles with switching interaction topologies[J]. *Control Engineering Practice*, 2016, 46: 26-36.
- [7] SU Y, HUANG J. Stability of a class of linear switching systems with applications to two consensus problems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2012, 57(6): 1420-1430.
- [8] 沈林成. 多无人机自主协同控制理论与方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
- [9] 符小卫, 李建, 高晓光. 带通信约束的多无人机协同搜索中的目标分配[J]. *航空学报*, 2014, 35(5): 1347-1356.
- [10] 李少斌, 陈炎财, 杨忠, 等. 具有通信延迟的多无人机编队飞行控制[J]. *信息与控制*, 2012, 41(2): 142-146.
- [11] 郑重, 熊朝华, 党宏涛, 等. 时变通信延迟下的无人机编队鲁棒自适应控制[J]. *中国惯性技术学报*, 2016, 24(1): 108-113.
- [12] 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.
- [13] JIANG F, WANG L, XIE G. Consensus of high-order dynamic multi-agent systems with switching topology

- and time-varying delays[J].Journal of Control Theory & Applications,2010,8(1):52-60.
- [14] WEI R,BEARD R W.Distributed consensus in multi-vehicle cooperative control[J].Communications & Control Engineering,2008,27(2):71-82.
- [15] ABDESSAMEUD ABDELKADER,TAYEBI ABDEL-  
HAMID.垂直起降无人机的运动协调[M].北京:国防工业出版社,2015.
- [16] DONG L,CHAI S,ZHANG B,et al.High-order tracking problem with a time-varying topology and communication delays[J].Neurocomputing,2015,149(23):1360-1369.

## Attitude Synchronization Control for Multiple UAVs with Communication Delay and Topological Time-Varying

*YU Liang<sup>a</sup>, LIN Da<sup>b</sup>, REN Bin<sup>a</sup>, TANG Yu<sup>a</sup>*

(a. School of Automation and Information Engineering; b. School of Physics and Electronics Engineering, Sichuan University of Science & Engineering, Zigong 643000, China)

**Abstract:** For the multi-UAVs system model with second-order dynamics, the attitude synchronization problem of multi-UAVs systems with communication delay and time-varying communication topology is studied, and the consistency condition of attitude synchronization is analyzed. An attitude synchronization control scheme is designed, and the control scheme is theoretically proved by attitude dynamics and Lyapunov-Krasovskii functional. The simulation results show that when the parameters such as communication delay and communication topology are randomly switched, the attitude synchronization control algorithm can effectively solve the problem of attitude synchronization, and the performance of attitude keeping and relative attitude keeping can reach a better level.

**Key words:** multi-UAVs; communication delay; topological time-varying; attitude synchronization