

doi: 10.7690/bgzdh.2024.11.020

异构全域无人系统的稳定性分析

陈勇, 文凤, 潘成伟, 张龙杰, 贺叶杰, 陈琦超

(电子科技大学自动化工程学院, 成都 611731)

摘要: 为解决异构无人系统模型之间的通信交互及协同控制问题, 建立一种异构全域无人系统 (heterogeneous all-domain unmanned system, HADS) 控制模型。建立异构全域无人系统通用动力学模型, 利用反步法和通信链路设计实现全域无人系统的分布式协同控制。最终证明整个闭环系统的稳定性, 仿真实验验证了该方案的有效性。

关键词: 异构全域无人系统; 稳定性; 分布式协同控制

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A

Stability Analysis of Heterogeneous Global Unmanned System

Chen Yong, Wen Feng, Pan Chengwei, Zhang Longjie, He Yejie, Chen Qichao

(School of Automation Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: In order to solve the problem of communication interaction and collaborative control between heterogeneous unmanned system models, a heterogeneous all-domain unmanned system (HADS) control model is established. The general dynamic model of the heterogeneous global unmanned system is established, and the distributed cooperative control of the global unmanned system is realized by using backstepping method and communication link design. Finally, the stability of the whole closed-loop system is proved, and the effectiveness of the scheme is verified by simulation experiments.

Keywords: heterogeneous global unmanned system; stability; distributed cooperative control

0 引言

由于无人系统的协同控制具有减少交通拥堵和合理利用社会资源的巨大潜力, 近年来, 无人系统的协同控制受到了广泛关注, 并且仍然是一个值得研究的问题。基于这一优势, 对无人集群进行了广泛的研究, 主要集中在开发和维持特定编队, 或者是速度和姿态的协同跟踪。例如, 文献[1]中考虑了多无人机的编队跟踪控制, 并采用模糊 H_∞ 鲁棒控制策略, 在文献[2]中, 进一步考虑了无人机的容错协同跟踪控制问题。此外, Ringback 等^[3]考虑了无人艇的编队控制, 在现有工作中, 通常考虑了异构无人集群, 并设计了相应的分布式跟踪控制器^[4]。笔者提出异构全域无人系统模型。

1 理论与建模

1.1 空域无人机系统模型建立

无人机系统的理想无干扰动力学模型可表示为:

$$\dot{\chi}_a^p = R_a^p \mu_a^p, \quad M_a \dot{\mu}_a^p = D_a^p \tau_a^p. \quad (1)$$

式中: $\chi_a^p = [x_a^p, y_a^p, z_a^p, \phi_a^p, \theta_a^p, \psi_a^p]^T \in \mathbb{R}^6$ 为地球坐标系中不同坐标轴的位置矢量和转向角矢量; $\mu_a^p =$

$[u_a^p, v_a^p, w_a^p, p_a^p, q_a^p, r_a^p]^T \in \mathbb{R}^6$ 为无人机机体坐标系中的速度和角速度; $M_a = \text{diag}(m_a, m_a, m_a, I_{ax}, I_{ay}, I_{az}) \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ 为重量和惯量矩阵; τ_a^p 为控制输入; $R_a^p = \text{diag}(S_{a11}^p, S_{a12}^p)$; S_{a12}^p 为变换矩阵; $s_* = \sin()$, $c_* = \cos()$ 且 $t_* = \tan()$; D_a 为阻力系数 α_a 为从转子轴到中心距离 d 的控制参数矩阵。在转换过程中使用坐标旋转矩阵 R 和角速度转换矩阵 T 。通过两矩阵处理和简化得到的模型可以表示为:

$$\dot{\chi}_a = R_{a1} \mu_a + Q_{a1}, \quad \dot{\mu}_a = R_{a2} \tau_a + Q_{a2}. \quad (2)$$

式中: χ_a 为位置矢量和转向角矢量; μ_a 为状态变量在水平面上的投影; τ_a 为新的控制输入。

1.2 海域无人艇系统模型建立

在海域中, 无人艇的动力学模型表示为:

$$\dot{\chi}_s^p = R_s^p \mu_s^p, \quad M_s \dot{\mu}_s^p = -C_s^p \mu_s^p + \tau_s^p. \quad (3)$$

式中: $\chi_s^p = [x_s^p, y_s^p, \psi_s^p]^T \in \mathbb{R}^3$ 为地球坐标系中的位置矢量和转向角矢量; $\mu_s^p = [u_s^p, v_s^p, r_s^p]^T \in \mathbb{R}^3$ 为机体坐标系下速度和角速度; $M_s = \text{diag}(m_{s1}, m_{s2}, m_{s3}) \in$

收稿日期: 2024-06-11; 修回日期: 2024-07-22

基金项目: 国家自然科学基金(61973331, 61973257, 61903064); 国家重点研发计划项目(2022YFE0120700); 四川省科学技术支持项目基金(2021YFG0079, 2021YFG0080, 2021YFG0082)

第一作者: 陈勇(1977—), 男, 四川人, 博士。

$\mathbb{R}^{3 \times 3}$ 为权重; τ_s^p 为控制输入; R_s^p 为变换矩阵; C_s^p 为科里奥利矩阵。

对于控制器的设计, 需要在模型结构中加入这些状态变量 $[z, \phi, \theta, w, p, q]$, 转换后的模型为无人艇的动力学模型, 它表示为:

$$\dot{\chi}_s = R_{s1}\mu_s + Q_{s1}, \quad \dot{\mu}_s = R_{s2}\tau_s + Q_{s2} \quad (4)$$

式中: χ_s 为原始状态变量; μ_s 为状态变量在水平面上的投影; τ_s 为新的控制输入。

1.3 陆域无人车系统模型建立

陆域无人车的动力学模型转换与无人艇相似。原始模型可表示为:

$$\dot{\chi}_g^p = R_g^p \mu_g^p, \quad \dot{\mu}_g^p = C_g^p \mu_g^p + \tau_g^p \quad (5)$$

式中: $\dot{\chi}_g^p = [x_g^p, y_g^p, \psi_g^p]^T \in \mathbb{R}^3$; $\dot{\mu}_g^p = [u_g^p, v_g^p, r_g^p]^T \in \mathbb{R}^3$ 。

并且转换后的模型可表示为:

$$\dot{\chi}_g = R_{g1}\mu_g + Q_{g1}, \quad \dot{\mu}_g = R_{g2}\tau_g + Q_{g2} \quad (6)$$

式中: χ_g 为原始状态变量; μ_g 为状态变量在水平面上的投影; τ_g 为新的控制输入。

在此理想模型的基础上, 完成了通信拓扑图的构建。第 $i(i=1, 2, \dots, N)$ 个跟随者可以表示为:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_{i,k} &= F_{i,k}(X_i)x_{i,k+1} + G_{i,k}(X_i), \quad 1 \leq k \leq n_i - 1 \\ \dot{x}_{i,n_i} &= F_{i,n_i}(X_i)\tau_i + G_{i,n_i}(X_i) \\ y_i &= x_{i,1} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中: $X_i = [x_{i,1}, \dots, x_{i,n_i}]^T \in \mathbb{R}^{n_i \times 6}$ 为整个系统的状态变量; $y_i \in \mathbb{R}^6$ 为系统输出; $\tau_i \in \mathbb{R}^6$ 是系统输入; $F_{i,k}(\bullet)$ 和 $G_{i,k}(\bullet)$ 为平滑函数。领导者可以被建模为:

$$\dot{x}_d = F_d(x_d, t), \quad y_d = x_d \quad (8)$$

式中: $y_d \in \mathbb{R}^6$ 为领导者的输出; $F_d(\bullet)$ 为 t 的连续函数。

1.4 协同目标建立

对具有跨域通信链路网络的无人系统进行建模。通过异构连接链路构造邻居节点和领导节点之间的一致性误差。因此, 无人系统的跟踪误差可表示为:

$$e_{i,1} = \sum_{j=1}^N a_{ij}(y_i - y_j) + b_i(y_i - y_d) \quad (9)$$

式中: $i=1, \dots, N$; $B = [b_1, \dots, b_N]^T \in \mathbb{R}^N$, B 中的元素 $b_i > 0$ 为从领导者到追随者的通信权重。

2 稳定性分析

在本节中, 我们定义 $e_{i,k} = x_{i,k} - \alpha_{i,k-1}$ ($2 \leq k \leq n_i$), 其中 $\alpha_{i,k-1}$ 是在步骤 k 中设计的虚拟控制器。

基于理想模型和递归协同控制方法, 设计了模型中的控制律:

$$\tau_i = -f_{i,n_i} e_{i,n_i} / 2 - F_{i,n_i}^{-1} H_{i,n_i} \quad (10)$$

式中: f_{i,n_i} 为控制参数。

定理 利用通信拓扑和递归协同控制, 考虑通过坐标变换和参数互补得到的异构全域无人系统式(1)-(7), 将控制方案式(11)-(17)组成闭环控制系统, 实现无人系统式(18)-(19)对期望轨迹的稳定跟踪。

步骤 1 我们设计了 $e_{i,1}$ 的复合函数, 其微分可以表示为:

$$\begin{aligned} \dot{e}_{i,1} &= (d_i + b_i)(F_{i,1}x_{i,2} + G_{i,1}) - \\ & b_i F_d - \sum_{j=1}^N a_{i,j}(F_{j,1}x_{j,2} + G_{j,1}) \end{aligned} \quad (11)$$

在一个无人系统模型中设计第一个子 Lyapunov 函数:

$$V_{i,1} = e_{i,1}^T e_{i,1} / 2 \quad (12)$$

第一个虚拟控制律设为:

$$\alpha_{i,1} = -(f_{i,1} e_{i,1} / 2 + F_{i,1}^{-1} H_{i,1}) / (d_i + b_i) \quad (13)$$

式中 $f_{i,1}$ 为一个正设计常数。结合式(11)和(13), 可以得到:

$$\dot{V}_{i,1} \leq -f_{i,1} f_0 e_{i,1}^T e_{i,1} / 2 + (d_i + b_i) e_{i,1}^T F_{i,1} e_{i,2} \quad (14)$$

步骤 k ($2 \leq k \leq n_i - 1$)。当 $k=2$ 时, 有 $d+b=d_i+b_i$, 其他情况有 $d+b=1$ 。第 k 个虚拟控制律为:

$$\alpha_{i,k} = -f_{i,k} \frac{e_{i,k}}{2} - F_{i,k}^{-1} H_{i,k} \quad (15)$$

式中 $f_{i,k}$ 为正设计常数, 结合式(15), 则可以得到:

$$\dot{V}_{i,k} \leq -f_0 \sum_{j=1}^k f_{i,j} e_{i,j}^T e_{i,j} / 2 + e_{i,k}^T F_{i,k} e_{i,k+1} \quad (16)$$

步骤 n 在这一步中, 将得到第 i 个无人系统的真实控制律, 可以得到:

$$\dot{V}_i \leq -f_0 \sum_{j=1}^{n_i} f_{i,j} e_{i,j}^T e_{i,j} / 2 \leq -\eta_i V_i \quad (17)$$

式中 $\eta_i = \min\{f_0 f_{i,j}\} > 0$, $j=1, \dots, n_i$ 。

证明 取异构全域无人系统中的 Lyapunov 函数为:

$$V = \sum_{i=1}^N V_i \quad (18)$$

式中 $\eta = \min\{\eta_i\} > 0$, $i = 1, \dots, N$, 则其微分不等式可以表示为:

$$\dot{V} \leq -\eta V \quad (19)$$

由式(19)可知, 异构全域无人系统中的状态变量是有界的, 且跟踪误差能够收敛到零。

3 仿真分析

在本节中, 为了验证算法的有效性和可行性, 通过仿真实验来验证由实际模型组成的异构全域无人系统。对于提出的异构全域无人系统, 我们选择了海域、陆域、空域 3 个域进行仿真验证, 其中每个域包含一个异构无人系统模, 如图 1 所示。领导者的动力学模型为:

$$\dot{x}_d = 10, \dot{y}_d = 5, \dot{\psi}_d = \begin{cases} 0.1 \cos(\pi t), & 0 \leq t < 30 \\ 0, & 30 \leq t < 50 \end{cases};$$

$$x_d = [x_d, y_d, z_d, \phi_d, \theta_d, \psi_d]^T = [x_d, y_d, 100, 0, 0, \psi_d]^T$$

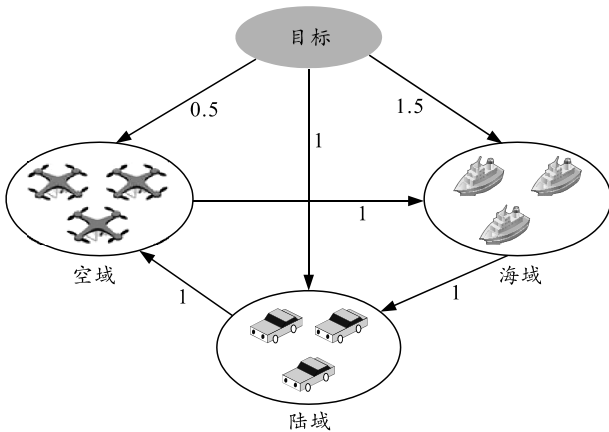
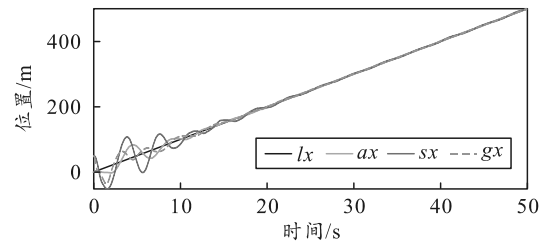


图 1 通信结构

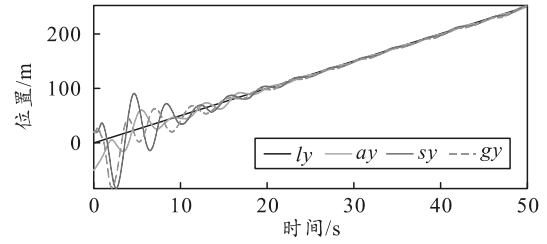
在仿真实验中, 初始条件选择为 $[y_a, x_s, y_s, z_s, x_g, y_g, z_g] = [-50, 50, 20, 100, 50, 20, 100]$, 其他条件都是 0。

如图 2 所示, 无人机、无人艇和无人车组成的异构系统的运动轨迹将跟踪领导节点生成的参考轨迹。对于领导节点在 x 维和 y 维的位置, 3 辆车可以按照预设的轨迹进行跟踪, 如图 2 (a)和(b)所示。在图 2 (c)中, 无人车和无人艇可以与参考轨迹保持一致。且无人机高度与跟踪目标保持稳定距离。无人系统的一致性误差如图 3 所示, 无人机、无人艇和无人车的系统状态的一致性误差都将达到 0。在异构全域无人系统中, 传递给不同模型的控制输入如图 4 所示。这些控制信号也可以通过前一节的理

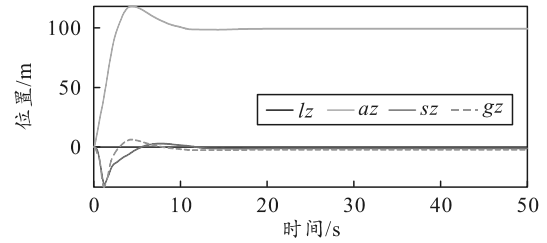
论推导过程来稳定。



(a) 全域无人系统 X 轴位置

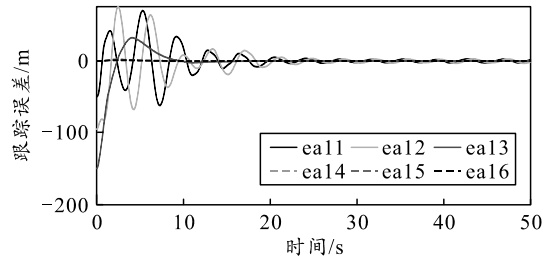


(b) 全域无人系统 Y 轴位置

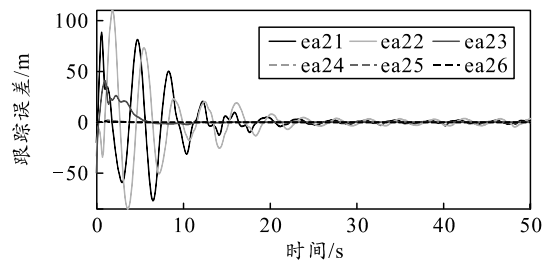


(c) 全域无人系统 Z 轴位置

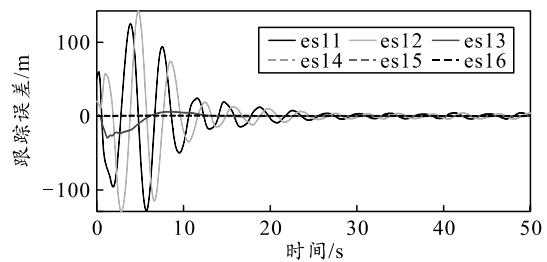
图 2 异构全域无人系统的跟踪性能



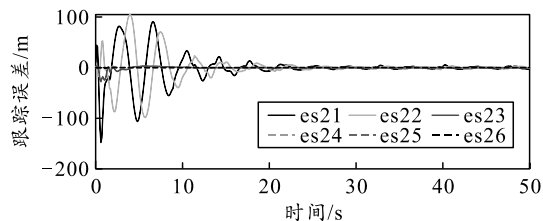
(a) 无人机 X 轴位置跟踪误差



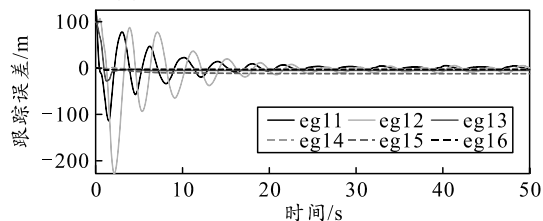
(b) 无人机 Y 轴位置跟踪误差



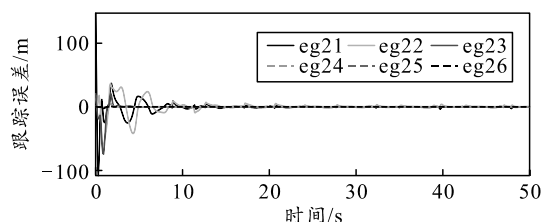
(c) 无人艇 X 轴位置跟踪误差



(d) 无人艇 Y 轴位置跟踪误差

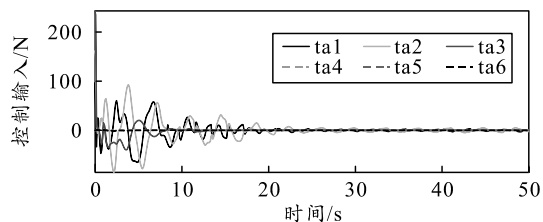


(e) 无人车 X 轴位置跟踪误差

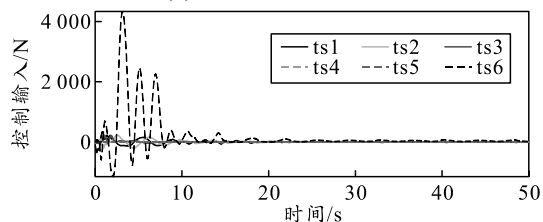


(f) 无人车 Y 轴位置跟踪误差

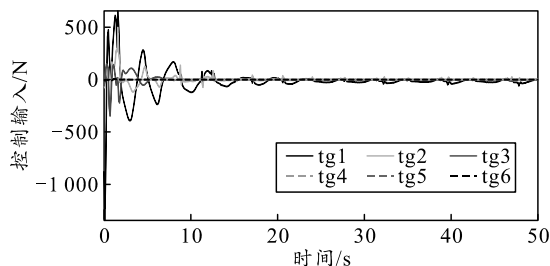
图 3 异构全域无人系统的跟踪误差



(a) 无人机控制输入



(b) 无人艇控制输入



(c) 无人车控制输入

图 4 异构全域无人系统的控制输入

4 结束语

介绍了异构全域无人系统模型的协同控制问题。基于反步法提出了一种协同控制方法。通过推理论证和仿真分析，验证了所提方法的可行性，保证了所有状态变量都是有界的，并保证了不同的无人系统能够在 3 维空间中跟踪目标领导者的轨迹。在实际情况下，系统的状态方程可能是非线性且不可知的，并伴随着外界的干扰和攻击，如何解决这些问题将是我们今后需要研究和解决的问题。

参考文献：

- [1] CHEN B S, WANG C P, LEE M Y, Stochastic Robust Team Tracking Control of Multi-UAV Networked System Under Wiener and Poisson Random Fluctuations[J]. IEEE Trans. Cybern, 2021, 51(12): 5786–5799.
- [2] ZHANG B Y, SUN X X, LIU S G, et al. Event-Triggered Adaptive Fault-Tolerant Synchronization Tracking Control for Multiple 6-DOF Fixed-Wing UAVs IEEE Trans. Veh. Technol., 2022, 71(1): 148–161.
- [3] RINGBACK R, WEI J Q, ERSTORP E S, et al. Multi-Agent Formation Tracking for Autonomous Surface Vehicles[J]. IEEE Trans. Contr. Syst. Technol., 2021, 29(6): 2287–2298.
- [4] MICHALEK M M. Cascade-Like Modular Tracking Controller for non-Standard N-Trailers[J]. IEEE Trans. Contr. Syst. Technol., 201725(2): 619–627.