

## 多无人机目标追踪自适应控制

李秋妮<sup>1</sup>, 杨任农<sup>2</sup>, 刘棕成<sup>1†</sup>

(1. 空军工程大学 航空工程学院, 西安 710038; 2. 空军工程大学 空管领航学院, 西安 710051)

**摘要:** 针对多无人机自动驾驶仪速度与航向角通道系数未知的目标轨迹追踪问题, 提出一种自适应追踪控制方法. 通过对自动驾驶仪通道系数进行在线估计, 解决了系数未知所造成的设计困难. 为克服外界干扰及系统内部误差因素对无人机运动控制系统的影响, 设计了补偿项来消除干扰项的影响. 采用 Lyapunov 定理证明了轨迹追踪误差最终可收敛于任意小的区域内. 仿真结果验证了所设计方法的有效性.

**关键词:** 多无人机; 目标追踪; 自适应控制; 自动驾驶仪; 在线估计

中图分类号: TP273

文献标志码: A

## Adaptive target tracking control for multiple unmanned aerial vehicles

LI Qiu-ni<sup>1</sup>, YANG Ren-nong<sup>2</sup>, LIU Zong-cheng<sup>1†</sup>

(1. Aeronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China; 2. ATC Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

**Abstract:** An adaptive tracking control method is proposed for the problem of multiple unmanned aerial vehicles (UAVs) tracking desired trajectory under the condition that the coefficients of velocity channel and heading angle channel of autopilot are unknown. These coefficients of autopilot channels are online estimated so as to deal with the design difficulty caused by the unknown coefficients. To attenuate the effect of external disturbance and interior system error on UAVs control system, a compensator is designed. Moreover, by using the Lyapunov functions, it is proved that the trajectory tracking error can eventually converge to an arbitrary small area. Simulation results demonstrate the effectiveness of the proposed method.

**Keywords:** multiple unmanned aerial vehicles; target tracking; adaptive control; autopilot; online estimate

### 0 引言

多无人机协同执行任务具有高效、可靠、适应性强等优点, 可用于执行复杂而多样的军事任务, 因此受到了国内外学者及军事领域专家的广泛关注<sup>[1-7]</sup>.

多无人机在协同执行任务时常常需要各机到达目标轨迹或指定位置<sup>[8-10]</sup>, 如何保持稳定飞行以及按指定目标轨迹飞行是多无人机应用中需要解决的重要问题<sup>[11-13]</sup>. 目前, 在多智能体目标轨迹追踪控制方面已经取得了许多成果<sup>[14-16]</sup>. 然而, 这些成果主要针对智能体模型简单且为严反馈形式的情况, 不适用于模型复杂的多无人机控制问题<sup>[17]</sup>. 文献[8]将无人机自动驾驶仪速度与航向角通道的动态特性简化为一阶动态模型, 研究了多无人机同时到达的分散化控制方法, 所建立的一阶动态模型参数称为自动驾驶仪速度通道系数与航向角通道系数. 在此基础上, 文献[18]研究了多无人机追踪动态目标的协同控制

算法. 针对无领导者的多无人机编队控制问题, 文献[19]给出了基于边 Laplacian 一致性的分布式编队控制算法; 文献[3]研究了带有时间约束的多无人机编队的协同算法; 文献[20]研究了强风扰动下的同时到达问题. 对于多无人机的目标追踪问题, 这些方法都取得了很好的控制效果. 然而, 它们都是在自动驾驶仪速度与航向角通道系数已知的条件下进行控制设计的<sup>[21]</sup>. 对于自动驾驶仪速度与航向角通道系数未知情形的研究则非常匮乏, 此情形下的多无人机目标追踪控制方法设计也较为困难. 鉴于自适应控制方法对未知模型具有强大适应能力<sup>[22-25]</sup>, 本文将结合自适应理论对速度与航向角通道系数未知的问题进行研究.

本文利用自动驾驶仪一阶动态模型, 建立包含扰动和系统内部误差因素的多无人机运动模型; 针对模型中的自动驾驶仪速度与航向角通道系数未知问

收稿日期: 2018-03-21; 修回日期: 2018-09-04.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61603411).

责任编辑: 易建强.

†通讯作者. E-mail: liu434853780@163.com.

题,设计未知系数自适应估计方程;采用补偿项消除扰动和系统内部误差对控制系统精度的影响. 仿真实验表明,本文方法可以适用于自动驾驶仪通道系数未知的情形,并且具有抗干扰能力.

## 1 问题描述

### 1.1 无人机运动模型

本文研究多个固定翼 UAVs 在二维平面的目标追踪问题,不考虑 UAVs 飞行高度的变化. 对于第  $i$  架固定翼 UAV,其动态特性可以采用如下运动简化模型描述:

$$\dot{x}_i = V_i \cos \varphi_i, \quad (1)$$

$$\dot{y}_i = V_i \sin \varphi_i, \quad (2)$$

$$\dot{\varphi}_i = \omega_i. \quad (3)$$

其中:  $(x_i, y_i)$  为第  $i$  个无人机在二维平面中的位置,  $V_i$  为飞行速度,  $\varphi_i$  为航向角,  $\omega_i$  为航向角速度. 实际中,每架无人机都受到飞行速度和航向角速度的限制,如下所示:

$$0 < V_{\min,i} \leq V_i \leq V_{\max,i}, \quad (4)$$

$$|\omega_i| \leq \omega_{\max,i}, \quad (5)$$

其中  $V_{\min,i}$ 、 $V_{\max,i}$ 、 $\omega_{\max,i}$  由无人机的物理特性约束所决定.

理想的自动驾驶仪通常具有速度保持和航向保持能力,并且其响应特性近似于一阶动态特性. 因此,可将 UAVs 自动驾驶仪速度保持和航向保持动态特性<sup>[8]</sup>建模如下:

$$\dot{V}_i = a_{V,i}(V_i^c - V_i), \quad (6)$$

$$\dot{\varphi}_i = a_{\varphi,i}(\varphi_i^c - \varphi_i). \quad (7)$$

其中:  $V_i^c$  和  $\varphi_i^c$  分别为自动驾驶仪航向角指令和速度指令;  $a_{V,i}$  和  $a_{\varphi,i}$  分别为自动驾驶仪中航向通道和速度通道系数,且满足  $a_{\varphi,i} > 0$ ,  $a_{V,i} > 0$ .

本文考虑追踪 UAVs 受到电子干扰以及系统内部误差,建立如下自动驾驶仪的速度保持和航向保持控制模型:

$$\dot{V}_i = a_{V,i}(V_i^c - V_i) + \Delta_{i1}(V_i, t), \quad (8)$$

$$\dot{\varphi}_i = a_{\varphi,i}(\varphi_i^c - \varphi_i) + \Delta_{i2}(\varphi_i, t). \quad (9)$$

其中:  $\Delta_{i1}(V_i, t)$  和  $\Delta_{i2}(\varphi_i, t)$  分别表示电子干扰对追踪 UAVs 的影响以及系统内部误差等.

**假设 1** 自动驾驶仪航向通道和速度通道系数  $a_{V,i}$  和  $a_{\varphi,i}$  均为未知,且满足  $a_{\varphi,i} = c_0 a_{V,i}$ ,  $c_0$  是已知正数.

定义  $\mathbf{P}_i = (x_i, y_i)^T$ ,  $\mathbf{V}_{i,P} = [V_{i,x}, V_{i,y}]^T$ ,  $V_{i,x} =$

$V_i \cos \varphi_i$ ,  $V_{i,y} = V_i \sin \varphi_i$ . 根据式(1)、(2)、(8)和(9),可建立如下的无人机运动模型:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{P}}_i = \mathbf{V}_{i,P}, \\ \dot{V}_{i,x} = (a_{V,i}(u_{i1} - V_i) + \Delta_{i1}(V_i, t)) \cos \varphi_i - \\ \quad V_i(a_{\varphi,i}(u_{i2} - \varphi_i) + \Delta_{i2}(\varphi_i, t)) \sin \varphi_i, \\ \dot{V}_{i,y} = (a_{V,i}(u_{i1} - V_i) + \Delta_{i1}(V_i, t)) \sin \varphi_i + \\ \quad V_i(a_{\varphi,i}(u_{i2} - \varphi_i) + \Delta_{i2}(\varphi_i, t)) \cos \varphi_i. \end{cases} \quad (10)$$

其中:  $u_{i1} = V_i^c$ ,  $u_{i2} = \varphi_i^c$ .

定义

$$\mathbf{f}_i(V_i, \varphi_i) = \begin{bmatrix} -V_i a_{V,i} \cos \varphi_i + V_i \varphi_i a_{\varphi,i} \sin \varphi_i \\ -V_i a_{V,i} \sin \varphi_i - V_i \varphi_i a_{\varphi,i} \cos \varphi_i \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$$\Delta_i = \begin{bmatrix} \Delta_i^{(1)} \\ \Delta_i^{(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta_{i1}(V_i, t) \cos \varphi_i - V_i \Delta_{i2}(\varphi_i, t) \sin \varphi_i \\ \Delta_{i1}(V_i, t) \sin \varphi_i + V_i \Delta_{i2}(\varphi_i, t) \cos \varphi_i \end{bmatrix}, \quad (12)$$

$$\mathbf{B}_{i0} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_i & -V_i \sin \varphi_i \\ \sin \varphi_i & V_i \cos \varphi_i \end{bmatrix}, \quad (13)$$

$$\boldsymbol{\alpha}_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & c_0 \end{bmatrix}, \quad (14)$$

则模型(10)可以写成

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{P}}_i = \mathbf{V}_{i,P}, \\ \dot{\mathbf{V}}_{i,P} = \mathbf{f}_i(V_i, \varphi_i) + a_{V,i} \mathbf{B}_i \mathbf{u}_i + \Delta_i. \end{cases} \quad (15)$$

其中:  $\mathbf{u}_i = [u_{i1}, u_{i2}]^T$ ,  $\mathbf{B}_i = \mathbf{B}_{i0} \boldsymbol{\alpha}_i$ .

**假设 2** 干扰项  $\Delta_{i1}(V_i, t)$  和  $\Delta_{i2}(\varphi_i, t)$  是有界的,即存在未知正数  $\Delta_{i1}^*$  和  $\Delta_{i2}^*$ ,使得  $|\Delta_{i1}(V_i, t)| \leq \Delta_{i1}^*$  和  $|\Delta_{i2}(\varphi_i, t)| \leq \Delta_{i2}^*$  成立.

根据假设 2 不难得出下式成立:

$$|\Delta_i^{(1)}| \leq \Delta_{i1}^* + V_{\max,i} \Delta_{i2}^*, \quad (16)$$

$$|\Delta_i^{(2)}| \leq \Delta_{i1}^* + V_{\max,i} \Delta_{i2}^*. \quad (17)$$

### 1.2 目标轨迹模型

令目标 UAV 在  $t$  时刻的坐标为  $(x_T(t), y_T(t))$ , 目标 UAV 的航向角为  $\psi_{VD}$ , 取逆时针时的  $\psi_{VD}(t)$  值为正. 定义第  $i$  个追踪 UAV 的目标追踪轨迹为  $\mathbf{P}_{id} = (x_{id}^*, y_{id}^*)^T$ ,  $x_{id}^*$  和  $y_{id}^*$  定义为

$$\begin{cases} x_{id}^*(t) = x_T(t) + R_T \cos(q_i^* + \psi_{VD}(t)), \\ y_{id}^*(t) = y_T(t) + R_T \sin(q_i^* + \psi_{VD}(t)), \end{cases} \quad (18)$$

其中  $R_T$  和  $q_i^*$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) 是给定的常数.

本文的控制目标是设计自动驾驶仪的速度通道控制指令  $u_{i1}$  和航向角通道控制指令  $u_{i2}$ , 使得第  $i$  个 UAV 能够追踪上目标轨迹  $P_{id}$ .

## 2 多无人机目标追踪控制指令设计与稳定性分析

设计自动驾驶仪的速度通道控制指令和航向角控制指令是能够实现 UAVs 稳定飞行和轨迹跟踪的关键. 本节将基于所建立的无人机运动模型 (10), 设计能够估计自动驾驶仪控制通道未知参数, 并实现轨迹跟踪的自适应控制指令.

### 2.1 目标追踪自适应控制指令设计

对于第  $i$  个 UAV 而言, 其追踪误差为

$$e_{P,i} = P_i - P_{id}. \quad (19)$$

求  $e_{P,i}$  关于时间的导数可得

$$\begin{aligned} \dot{e}_{P,i} &= \dot{P}_i - \dot{P}_{id} = \\ &-k_{i1}e_{P,i} + V_{i,P} + k_{i1}e_{P,i} - \dot{P}_{id}, \end{aligned} \quad (20)$$

其中  $k_{i1} > 0$  为待设计参数.

令第  $i$  个 UAV 的理想追踪速度  $V_{id}$  为

$$V_{id} = \dot{P}_{id} - k_{i1}e_{P,i}. \quad (21)$$

由式 (20) 不难发现, 若  $V_{i,P} = V_{id}$ , 则追踪误差  $e_{P,i}$  将收敛到 0. 令  $V_{i,P}$  与理想追踪速度  $V_{id}$  的误差  $e_{V,i}$  为

$$e_{V,i} = V_{i,P} - V_{id}. \quad (22)$$

结合式 (15), 求  $e_{V,i}$  关于时间的导数, 可得

$$\begin{aligned} \dot{e}_{V,i} &= \dot{V}_{i,P} - \dot{V}_{id} = \\ &f_i(V_i, \varphi_i) + a_{V,i}B_{i0}\alpha_i u_i - \dot{V}_{id} + \Delta_i. \end{aligned} \quad (23)$$

由式 (11) ~ (14) 可得

$$f_i(V_i, \varphi_i) + a_{V,i}B_{i0}\alpha_i[V_i, \varphi_i]^T = 0. \quad (24)$$

因此, 本文设计多无人机目标追踪自适应控制指令  $u_i$  以及未知参数在线估计方程如下:

$$u_i = u_{if} + u_{ic}, \quad (25)$$

$$u_{if} = [V_i, \varphi_i]^T, \quad (26)$$

$$u_{ic} = \hat{h}_{V,i}\alpha_i^{-1}B_{i0}^{-1}\bar{u}_{ic}, \quad (27)$$

$$\bar{u}_{ic} = -k_{i,2}e_{V,i} - e_{P,i} + \dot{V}_{id} - S(e_{V,i})\rho_i, \quad (28)$$

$$\dot{\hat{h}}_{V,i} = -\gamma_{i,H}e_{V,i}^T\bar{u}_{ic} - \gamma_{i,H}\sigma_{i,H}\hat{h}_{V,i}. \quad (29)$$

其中

$$e_{V,i} = [e_{V,i}^{(1)}, e_{V,i}^{(2)}]^T, \quad (30)$$

$$S(e_{V,i}) = \begin{bmatrix} \text{sgn}(e_{V,i}^{(1)}) & 0 \\ 0 & \text{sgn}(e_{V,i}^{(2)}) \end{bmatrix}, \quad (31)$$

$k_{i,2}$ 、 $k_{i1}$ 、 $\gamma_{i,H}$ 、 $\sigma_{i,H}$ 、 $\rho_i$  是控制参数,  $\rho_i$  定义为  $\rho_i = [\rho_{i1}, \rho_{i2}]^T$ ,  $\hat{h}_{V,i}$  是对未知系数  $h_{V,i}$  的估计值,  $h_{V,i}$  的定义为  $h_{V,i} = a_{V,i}^{-1}$ . 式 (29) 是未知参数  $h_{V,i}$  的在线估计方程, 可对估计值  $\hat{h}_{V,i}$  进行在线更新. 采用估计值  $\hat{h}_{V,i}$  进行控制指令设计, 解决了自动驾驶仪控制通道参数  $a_{V,i}$  未知所造成的设计困难.  $S(e_{V,i})\rho_i$  是补偿项, 用于消除扰动和系统内部误差对控制系统精度的影响.

### 2.2 追踪控制系统稳定性分析

针对所设计的目标追踪自适应控制指令, 下面证明多无人机目标追踪控制系统的稳定性以及追踪误差的收敛性.

**定理 1** 考虑含干扰项且自动驾驶仪控制通道系数未知的无人机运动控制系统 (15), 在假设 1 和假设 2 的条件下, 如果采用控制指令 (25), 并选取设计参数  $k_{i,2} > 0, k_{i1} > 0, \gamma_{i,H} > 0, \sigma_{i,H} > 0, \rho_{i1} \geq \Delta_{i1}^* + V_{\max,i}\Delta_{i2}^*, \rho_{i2} \geq \Delta_{i1}^* + V_{\max,i}\Delta_{i2}^*$ , 则轨迹追踪误差满足

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} \|e_{P,i}\| \leq \beta_i, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (32)$$

其中  $\beta_i$  为与控制参数相关的正数, 且追踪控制系统是稳定的.

**证明** 结合式 (21) 和 (22), 可将式 (20) 转化为

$$\dot{e}_{P,i} = -k_{i1}e_{P,i} + e_{V,i}, \quad (33)$$

结合式 (24) ~ (26), 可将式 (23) 转化为

$$\dot{e}_{V,i} = a_{V,i}B_{i0}\alpha_i u_{if} - \dot{V}_{id} + \Delta_i. \quad (34)$$

对于第  $i$  个 UAV, 考察如下的 Lyapunov 函数:

$$L_i = \frac{1}{2}e_{P,i}^T e_{P,i} + \frac{1}{2}e_{V,i}^T e_{V,i} + \frac{a_{V,i}}{2\gamma_{i,H}}\tilde{h}_{V,i}^2, \quad (35)$$

其中  $\tilde{h}_{V,i} = h_{V,i} - \hat{h}_{V,i}$ .

由式 (33) 和 (34) 可知  $L_i$  关于时间的导数为

$$\begin{aligned} \dot{L}_i &= e_{P,i}^T(-k_{i1}e_{P,i} + e_{V,i}) - \frac{a_{V,i}}{\gamma_{i,H}}\tilde{h}_{V,i}\dot{\hat{h}}_{V,i} + \\ &e_{V,i}^T(a_{V,i}B_{i0}\alpha_i u_{ic} - \dot{V}_{id} + \Delta_i). \end{aligned} \quad (36)$$

将式 (27) 和 (29) 代入 (36) 可得

$$\begin{aligned} \dot{L}_i &= \\ &e_{P,i}^T(-k_{i1}e_{P,i} + e_{V,i}) + \\ &e_{V,i}^T(a_{V,i}\hat{h}_{V,i}\bar{u}_{ic} - \dot{V}_{id} + \Delta_i) - \\ &\frac{a_{V,i}}{\gamma_{i,H}}\tilde{h}_{V,i}(-\gamma_{i,H}e_{V,i}^T\bar{u}_{ic} - \gamma_{i,H}\sigma_{i,H}\hat{h}_{V,i}). \end{aligned} \quad (37)$$

利用下式:

$$a_{V,i}e_{V,i}^T\hat{h}_{V,i}\bar{u}_{ic} + a_{V,i}\tilde{h}_{V,i}e_{V,i}^T\bar{u}_{ic} = e_{V,i}^T\bar{u}_{ic}, \quad (38)$$

$$\sigma_{i,H}a_{V,i}\tilde{h}_{V,i}\hat{h}_{V,i} \leq \sigma_{i,H}a_{V,i}\left(\frac{h_{V,i}^2}{2} - \frac{\tilde{h}_{V,i}^2}{2}\right), \quad (39)$$

可将式(37)转化为

$$\begin{aligned} \dot{L}_i \leq & e_{P,i}^T (-k_{i1} e_{P,i} + e_{V,i}) - \frac{\sigma_{i,H} a_{V,i}}{2} \tilde{h}_{V,i}^2 + \\ & e_{V,i}^T (\bar{u}_{ic} - \dot{V}_{id} + \Delta_i) + \frac{\sigma_{i,H} a_{V,i}}{2} h_{V,i}^2. \end{aligned} \quad (40)$$

将式(28)代入(40)可得

$$\begin{aligned} \dot{L}_i \leq & -k_{i1} e_{P,i}^T e_{P,i} - k_{i2} e_{V,i}^T e_{V,i} - \frac{\sigma_{i,H} a_{V,i}}{2} \tilde{h}_{V,i}^2 + \\ & e_{V,i}^T (-S(e_{V,i}) \rho_i + \Delta_i) + \frac{\sigma_{i,H} a_{V,i}}{2} h_{V,i}^2. \end{aligned} \quad (41)$$

由式(16)和(17)可知

$$\begin{aligned} e_{V,i}^T \Delta_i - e_{V,i}^T S(e_{V,i}) \rho_i = \\ \sum_{k=1}^2 e_{V,i}^{(k)} \Delta_i^{(k)} - \sum_{k=1}^2 e_{V,i}^{(k)} \rho_{ik} \leq 0. \end{aligned} \quad (42)$$

因此,结合式(41)和(42)可得

$$\begin{aligned} \dot{L}_i \leq & -k_{i1} e_{P,i}^T e_{P,i} - k_{i2} e_{V,i}^T e_{V,i} - \\ & \frac{\sigma_{i,H} a_{V,i}}{2} \tilde{h}_{V,i}^2 + \frac{\sigma_{i,H} a_{V,i}}{2} h_{V,i}^2. \end{aligned} \quad (43)$$

进一步可知

$$\dot{L}_i \leq -C_{i0} L_i + C_{i1}. \quad (44)$$

其中

$$\begin{aligned} C_{i0} &= \min\{2k_{i1}, 2k_{i2}, \sigma_{i,H} \gamma_{i,H}\}, \\ C_{i1} &= \frac{\sigma_{i,H} a_{V,i}}{2} h_{V,i}^2. \end{aligned}$$

在区间 $[0, t]$ 上,对式(44)两边进行积分得

$$L_i(t) e^{C_{i0} t} - L_i(0) \leq \frac{1}{C_{i0}} (C_{i1} e^{C_{i0} t} - C_{i1}), \quad (45)$$

于是有

$$L_i(t) \leq \left( L_i(0) - \frac{C_{i1}}{C_{i0}} \right) e^{-C_{i0} t} + \frac{C_{i1}}{C_{i0}}. \quad (46)$$

由式(46)和 $C_{i0} > 0, C_{i1} > 0$ 可知, $L_i(t)$ 是有界的. 由于 $L_i(t)$ 是有界的, $e_{P,i}, e_{V,i}, \tilde{h}_{V,i}$ 是有界的. 因此,追踪控制系统是稳定的.

由式(35)和(46)可知

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow +\infty} \|e_{P,i}\| \leq \\ \lim_{t \rightarrow +\infty} \sqrt{2 \left( \left( L_i(0) - \frac{C_{i1}}{C_{i0}} \right) e^{-C_{i0} t} + \frac{C_{i1}}{C_{i0}} \right)}, \end{aligned} \quad (47)$$

其中 $i = 1, 2, \dots, N$ .

由于

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} \sqrt{2 \left( L_i(0) - \frac{C_{i1}}{C_{i0}} \right) e^{-C_{i0} t}} = 0, \quad (48)$$

由式(47)和(48)可知

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} \|e_{P,i}\| \leq \beta_i, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (49)$$

其中 $\beta_i = \sqrt{2C_{i1}/C_{i0}}$ . 不难发现,可通过增大 $k_{i1}, k_{i2}, \gamma_{i,H}$ 和减小 $\sigma_{i,H}$ 使得 $\beta_i$ 任意小,因此定理1成立.  $\square$

### 3 实验分析

为验证本文所设计控制方法的有效性,对3个无人机追踪目标轨迹的情形进行仿真实验分析.

假定3个追踪无人机分别为无人机1、无人机2、无人机3,被追踪的目标无人机 $D$ 的运动轨迹 $(x_T(t), y_T(t))$ 为

$$\begin{cases} x_T(t) = V_T \cos \varphi_T, \\ y_T(t) = V_T \sin \varphi_T. \end{cases} \quad (50)$$

其中: $V_T = 160 \text{ m/s}, \varphi_T = 1.3 - 0.03t$ . 令 $R_T = 80 \text{ m}$ ,当 $q_1^* = 0, q_2^* = \frac{2}{3}\pi, q_3^* = \frac{2}{3}\pi$ 时,式(18)所得到曲线分别为无人机1、无人机2、无人机3的目标追踪轨迹. 目标无人机 $D$ 在平面内初始位置为 $(700 \text{ m}, 0)$ ,无人机1、无人机2、无人机3的初始位置分别为 $(-1000 \text{ m}, -1000 \text{ m}), (-1000 \text{ m}, 1000 \text{ m}), (500 \text{ m}, -2000 \text{ m})$ . 仿真中,假设追踪无人机的自动驾驶仪控制通道系数分别为 $a_{V,1} = 0.08, a_{V,2} = 1, a_{V,3} = 0.1, c_0 = 10$ ;干扰项设置为 $\Delta_{i1} = \sin t, \Delta_{i2} = 0.2 \cos t, i = 1, 2, 3$ . 追踪无人机所受到的速度和航向角加速度约束分别为 $0 < 100 \text{ m/s} \leq V_i \leq 300 \text{ m/s}, |\omega_i| \leq \frac{\pi}{3} \text{ rad/s}, i = 1, 2, 3$ . 根据本文所设计的控制方法,采用式(25)构造追踪无人机的控制指令 $u_1, u_2, u_3$ . 对应的控制参数设置为 $k_{i1} = 0.1, k_{i2} = 15, \gamma_{i,H} = 10^{-5}, \sigma_{i,H} = 0.1, \rho_i = [3, 3]^T, i = 1, 2, 3$ . 所得到的仿真结果如图1~图5所示.

从图1可以看出,本文所设计的控制方法可使得无人机1、无人机2、无人机3很好地追踪各自的目标

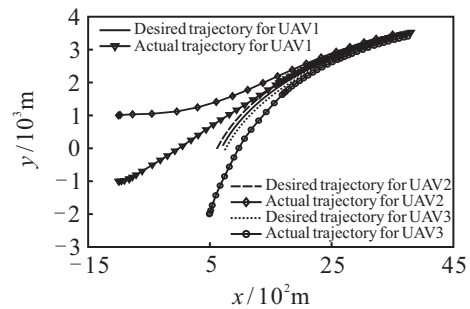


图1 目标追踪轨迹与实际追踪轨迹

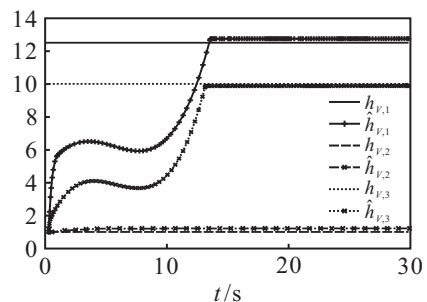


图2 自适应参数估计值变化曲线

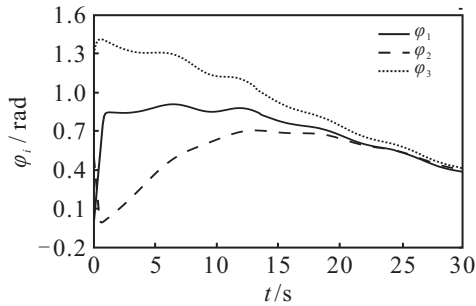


图3 航向角变化曲线

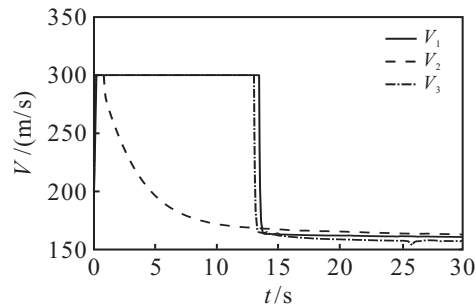


图4 速度变化曲线

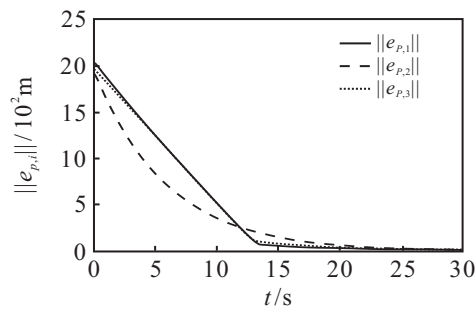


图5 轨迹跟踪误差变化曲线

轨迹。图2为自动驾驶仪控制通道系数  $h_{V,i}$  的自适应估计值  $\hat{h}_{V,i}$  变化曲线,从图2可以看出,采用本文方法能够对未知的自动驾驶仪控制通道参数  $h_{V,i}$  进行自适应估计。图3和图4分别为追踪无人机的航向角和飞行速度曲线,图5给出了3个无人机的轨迹跟踪误差。这些结果表明,采用本文方法不仅能对自动驾驶仪控制通道未知参数进行在线估计,并且能很好地克服干扰因素的影响,具有非常好的控制性能。

## 4 结论

本文对多无人机目标轨迹追踪问题进行了深入研究,设计了目标追踪自适应控制指令。通过对自动驾驶仪控制通道系数进行在线估计,解决了速度与航向角通道系数未知所造成的设计困难。为克服外界干扰及系统内部误差因素对无人机运动控制系统的影响,设计了在线补偿项来消除干扰项的影响,并证明了目标轨迹追踪误差可以收敛于一个任意小的范围内。仿真结果表明,所设计的控制方法能够使每个无人机都很好地追踪目标轨迹,达到了非常好的追踪效果。

## 参考文献(References)

- [1] 茹常剑,魏瑞轩,沈东.多无人机协同的稳定控制机理研究[J].物理学报,2014(22): 13-19.  
(Ru C J, Wei R X, Shen D. Study on stability control mechanism of multiple unmanned aerial vehicle cooperative system[J]. Acta Physica Sinica, 2014(22): 13-19.)
- [2] 茹常剑,魏瑞轩,祁晓明,等.自主协同系统的宏观稳定机理研究[J].物理学报,2015(10): 25-31.  
(Ru C J, Wei R X, Qi X M, et al. Macroscopic stable mechanism of autonomous cooperative system[J]. Acta Physica Sinica, 2015(10): 25-31.)
- [3] Mclain T W, Beard R W. Coordination variables, coordination functions, and cooperative timing missions[J]. J of Guidance Control & Dynamics, 2005, 28(1): 150-161.
- [4] No T S, Kim Y, Tahk M J, et al. Cascade-type guidance law design for multiple-UAV formation keeping[J]. Aerospace Science & Technology, 2011, 15(6): 431-439.
- [5] Lanillos P, Gan S K, Besada-Portas E, et al. Multi-UAV target search using decentralized gradient-based negotiation with expected observation[J]. Information Sciences, 2014, 282: 92-110.
- [6] Manathara J G, Sujit P B, Beard R W. Multiple UAV coalitions for a search and prosecute mission[J]. J of Intelligent & Robotic Systems, 2011, 62(1): 125-158.
- [7] Sun T Y, Huo C L, Tsai S J, et al. Intelligent flight task algorithm for unmanned aerial vehicle[J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(8): 10036-10048.
- [8] 袁利平,陈宗基,周锐,等.多无人机同时到达的分散化控制方法[J].航空学报,2010,31(4): 797-805.  
(Yuan L P, Chen Z J, Zhou R, et al. Decentralized control for simultaneous arrival of multiple UAVs[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010, 31(4): 797-805.)
- [9] Beard R W, Mclain T W, Nelson D B, et al. Decentralized cooperative aerial surveillance using fixed-wing miniature UAVs[J]. Proc of the IEEE, 2006, 94(7): 1306-1324.
- [10] 钟春梅,赵振宇,孙海波,等.多无人机协同目标跟踪闭环最优控制方法[J].探测与控制学报,2012,34(3): 13-18.  
(Zhong C M, Zhao Z Y, Sun H B, et al. A closed-loop optimal control for multiple unmanned aerial vehicles cooperative target tracking[J]. J of Detection & Control, 2012, 34(3): 13-18.)
- [11] 李大东,孙秀霞,李湘清.基于视觉的多无人机协同目标跟踪控制律设计[J].系统工程与电子技术,2012,34(2): 364-368.  
(Li D D, Sun X X, Li X Q. Multi-UAVs cooperative target tracking control law design based on computer vision[J]. Systems Engineering and Electronics, 2012, 34(2): 364-368.)
- [12] 张庆杰.基于一致性理论的多UAV分布式协同控制与状态估计方法[D].长沙:国防科技大学机电工程与自

- 动化学院, 2011: 1-4.  
(Zhang Q J. Distributed cooperative control and state estimation for networked multiple UAVs based on consensus theory[D]. Changsha: School of Mechatronic Engineering and Automation, National University of Defense Technology, 2011: 1-4.)
- [13] 邸斌, 周锐, 董卓宁. 考虑信息成功传递概率的多无人机协同目标最优观测与跟踪[J]. 控制与决策, 2016, 31(4): 616-622.  
(Di B, Zhou R, Dong Z N. Cooperative localization and tracking of multiple targets with the communication-aware unmanned aerial vehicle system[J]. Control and Decision, 2016, 31(4): 616-622.)
- [14] Li H, Chen G, Huang T, et al. High-Performance consensus control in networked systems with limited bandwidth communication and time-varying directed topologies[J]. IEEE Trans on Neural Networks & Learning Systems, 2017, 28(5): 1043-1054.
- [15] Zhang H, Jiang H, Luo Y, et al. Data-driven optimal consensus control for discrete-time multi-agent systems with unknown dynamics using reinforcement learning method[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2017, 64(5): 4091-4100.
- [16] Shang Y, Ye Y. Leader-follower fixed-time group consensus control of multiagent systems under directed topology[J]. Complexity, 2017, 2017: 1-9.
- [17] Yan M D, Zhu X, Zhang X X, et al. Consensus-based three-dimensional multi-UAV formation control strategy with high precision[J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2017, 18(7): 968-977.
- [18] 田鹏云, 胡孟权. 多飞行器动态目标追踪协同控制研究[J]. 飞行力学, 2017, 35(4): 52-55.  
(Tian P Y, Hu M Q. A cooperative control for multiple aerial vehicles tracking a moving target[J]. Flight Dynamics, 2017, 35(4): 52-55.)
- [19] 张苗苗, 魏晨. 基于边Laplacian一致性的多无人机编队控制方法[J]. 中国科学, 2017, 47(3): 259-265.  
(Zhang M M, Wei C. Multi-UAV formation control method based on edge Laplacian consensus[J]. Scientia Sinica Technologica, 2017, 47(3): 259-265.)
- [20] Nelson D R, McLain T W, Beard R W. Experiments in cooperative timing for miniature air vehicles[J]. J of Aerospace Computing Information & Communication, 2007, 4(8): 956-967.
- [21] Kingston D B, Ren W, Beard R W. Consensus algorithms are input-to-state stable[C]. Proc of the 2005 American Control Conf. Portland: IEEE, 2005: 1686-1690.
- [22] 刘棕成, 陈勇, 董新民, 等. 含执行器非线性的多操纵面飞机自适应跟踪控制[J]. 系统工程与电子技术, 2017, 39(2): 383-390.  
(Liu Z C, Chen Y, Dong X M, et al. Adaptive tracking control of multi-effector aircraft with actuator nonlinearity[J]. Systems Engineering and Electronics, 2017, 39(2): 383-390.)
- [23] Liu Z, Dong X, Xue J, et al. Adaptive neural control for a class of pure-feedback nonlinear systems via dynamic surface technique[J]. IEEE Trans on Neural Networks & Learning Systems, 2016, 27(9): 1969-1975.
- [24] Liu Z, Dong X, Xue J, et al. Adaptive neural control for a class of time-delay systems in the presence of backlash or dead-zone non-linearity[J]. IET Control Theory & Applications, 2014, 8(11): 1009-1022.
- [25] Li Q N, Yang R N, Liu Z C. Adaptive tracking control for a class of nonlinear non-strict-feedback systems[J]. Nonlinear Dynamics, 2017, 88(3): 1537-1550.

### 作者简介

李秋妮(1985—), 女, 讲师, 博士, 从事自适应控制、多智能体控制等研究, E-mail: lqnjk1@126.com;

杨任农(1969—), 男, 教授, 硕士, 从事智能系统、多目标决策等研究, E-mail: yangrn6907@foxmail.com;

刘棕成(1987—), 男, 讲师, 博士, 从事智能控制、飞行控制等研究, E-mail: liu434853780@163.com.

(责任编辑: 齐 霖)

## 《控制与决策》被评为“2019中国国际影响力优秀学术期刊”

**本刊讯:** 2019年10月28日~29日, “2019中国学术期刊未来论坛”在北京召开, 发布了由中国学术文献国际评价研究中心和清华大学图书馆研制、中国知网出版的《中国学术期刊国际引证年报(2019版)》(简称:《年报》)。《年报》发布了国内学术期刊的重要评价指标, 并对期刊国际影响力作出了综合评估, 客观公正地分析了国内学术期刊在国际业界的影响力水

平, 得到了学术界和期刊界以及相关部门的高度认可。

《年报》数据显示, 《控制与决策》的国际影响力指数在3900余种自然科学与工程技术类期刊中排名Top10%, 在全国140种自动化和计算机领域期刊中排名第5, 被评为“2019中国国际影响力优秀学术期刊”, 充分体现了《控制与决策》在国际自动化控制领域的权威性和影响力。