

DOI:10.16356/j.1005-2615.2019.06.007

基于连续螺旋滑模的无人机分布式编队控制

彭麒麟 宗群 王丹丹 冯聪

(天津大学电气自动化与信息工程学院,天津,300072)

摘要:为了解决复杂环境中无人机分布式编队控制问题,考虑外界干扰影响和状态信息不完全反馈情况,对无人机设计分布式编队控制器。无人机利用自身位置反馈,基于二阶精确微分器设计状态观测器,得到无人机速度和干扰的估计值;结合自身估计信息和邻机位置、速度的估计,基于连续螺旋滑模控制方法设计编队控制器和姿态跟踪控制器;稳定性分析保证了无人机闭环系统稳定性。基于 Matlab/Simulink 数值仿真和软件在环实时仿真平台,验证了所设计控制算法的有效性,并演示了三维可视化仿真结果。

关键词:连续螺旋滑模;无人机;分布式编队;三维可视化

中图分类号:V448.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2615(2019)06-0778-07

Distributed Formation Control of UAVs Based on Continuous Spiral Sliding Mode

PENG Qilin, ZONG Qun, WANG Dandan, FENG Cong

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

Abstract: In order to solve the formation control problem for unmanned aerial vehicle (UAV) in a complex environment, a distributed formation controller is designed considering the external disturbance and incomplete feedback of state information. By using the position feedback, a state observer is proposed based on second-order precise differentiator. Then, the velocity of UAV and the estimate of external disturbance are derived. Combining the estimation information and the positions and velocities of its adjacent UAVs, the formation controller and attitude tracking controller are designed based on the continuous twisting sliding mode control method. The stability analysis ensures the stability of UAV's closed loop system. The control algorithm is verified on the Matlab/Simulink and a software-in-the-loop simulation platform, and the proposed method is verified and demonstrated via 3D visualization.

Key words: continuous spiral sliding; unmanned aerial vehicle (UAV); distributed formation; 3D visualization

多无人机编队飞行比单个无人机飞行能高效完成更加复杂的任务,如协同探测、搜救、感知等^[1]。在复杂环境中,外界风等干扰可能会导致多无人机无法形成编队,电子等干扰可能会导致无人机自身状态不完全可测^[2-3]。研究多无人机编队飞行中抗干扰和无速度测量的控制来实现协同探测具有重要的研究意义。

无人机编队控制主要包括集中式和分布式^[3],分布式编队中每架无人机仅协同邻近无人机的信息,可实现大规模编队飞行,与前一种编队方式相比具有很大优势。目前无人机编队控制算法,主要有PID方法^[4-5]、智能优化方法^[6]、滑模方法^[7]等。相比于其他方法,滑模控制由于强鲁棒性被广泛应用。相比较于其他滑模方法,连续螺旋方法是直接

基金项目:国家自然科学基金(61673294,61573060)资助项目;装备预研联合基金(6141A02022328)资助项目。

收稿日期:2018-11-19;**修订日期:**2019-04-23

通信作者:宗群,男,教授,博士生导师,E-mail: zongqun@tju.edu.cn。

引用格式:彭麒麟,宗群,王丹丹,等.基于连续螺旋滑模的无人机分布式编队控制[J].南京航空航天大学学报,2019,51(6):778-784. PENG Qilin, ZONG Qun, WANG Dandan, et al. Distributed Formation Control of UAVs Based on Continuous Spiral Sliding Mode[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2019, 51(6): 778-784.

针对二阶系统的连续控制方法,无须选取线性/终端滑模面。多无人机编队飞行过程中,容易受到电子等干扰导致无人机自身速度状态无法获取,基于输出反馈^[8-9]的控制方法被广泛应用。为了同时处理速度状态未知和干扰未知,已有文献大多采用状态观测器来估计速度,采用干扰观测器估计干扰或者状态观测器和鲁棒控制器来鲁棒干扰影响。

目前大多数针对无人机编队控制理论的仿真验证仅停留在 Matlab 离线仿真阶段,该方式脱离实际工程环境,且不能验证控制算法的实时性。部分机构搭建了包含可视化与在线调参等功能在内的软件在环(Software-in-the-loop, SIL)实时仿真系统^[10-11],及“半实物”的硬件在环(Hardware-in-the-loop, HIL)仿真系统。美国麻省理工学院的 How 等人开发了8个无人机的测试床^[12],作为评估自主协同和控制算法的平台。Rasmussen 等基于 Matlab, Simulink 和 C++ 开发了 MultiUAV2 仿真系统^[13],用于多无人机自主协同执行战略任务的仿真研究。韩国建国大学搭建了硬件在环实时仿真平台^[14],用于多无人机协同控制的分布式实时仿真。美国陆军研究所 Garcia 等使用 Matlab 结合商用模拟器 X-Plane 开发了多无人机仿真平台^[15],用于多无人系统的协同控制研究,可以进行4架无人机的编队与导航控制仿真。新加坡国立大学的 Meng 等,基于 ROS 和 Unity3D 引擎开发了多无人机三维实时仿真系统 ROSUnitySim^[16],用于小型无人机在复杂环境下的路径规划研究。清华大学的周昊等使用多智能体技术搭建了无人机协同作战算法仿真平台 UAVSim^[17],用于模拟从任务分配到路径规划的协同全过程。国防科技大学基于 Simulink RTW 技术在分布式实时仿真研究方面取得了丰富的结果^[18-19]。北京航空航天大学、南京航空航天大学 and 西北工业大学均基于 Matlab 和 VxWorks 操作系统搭建了无人机实时仿真平台^[20-26]。针对无人机编队系统仿真对象规模较大的特点,采用 SIL 仿真验证的方式可以节约成本,具备更高的通用性和灵活性。

本文采用二阶精确微分器,利用位置编队误差同时观测速度和干扰,推广文献^[27]中单变量控制算法到多变量编队控制算法,结合估计值和多变量连续螺旋滑模方法,完成观测器和控制器综合设计。所设计的综合控制算法特点主要有,针对二阶系统,同时抗干扰和解决状态不可测的连续控制。另外,针对面向工程化实现的仿真需求,搭建无人机编队 SIL 实时仿真平台,在 Matlab 数值仿真的基础上,完成可视化 SIL 仿真演示验证。

1 无人机刚体模型

根据牛顿第二定理和欧拉方法,建立第 i 架无人机刚体模型

$$\begin{aligned} \dot{P}_i &= V_i \\ m\dot{V}_i &= mge_3 - f_i R_i e_3 + \Delta_{vi} \\ \dot{\Theta}_i &= \Pi_i \Omega_i \end{aligned} \quad (1)$$

$$J_i \dot{\Omega}_i = -S(\Omega_i) J_i \Omega_i + M_i + \Delta_{\Omega_i}$$

式中: $P_i = [x_i, y_i, z_i]^T$ 为无人机在大地坐标系(北-东-地)位置; $V_i = [u_i, v_i, w_i]^T$ 为无人机速度; $\Theta_i = [\phi_i, \theta_i, \psi_i]^T$ 为无人机姿态; $\Omega_i = [p_i, q_i, r_i]^T$ 为无人机姿态角速度; m_i 为无人机质量; g 为重力加速度; $e_3 = [0, 0, 1]^T$; f_i 为控制力; $U_{li} = \frac{f_i R_i e_3}{m}$ 表示虚拟控制加速度; M_i 为控制力; J_i 为转动惯量; Δ_{vi} , Δ_{Ω_i} 为外界干扰和模型不确定; R_i 和 Π_i 为旋转矩阵,表示如下

$$R_i = \begin{bmatrix} C_{\theta_i} C_{\psi_i} & S_{\phi_i} S_{\theta_i} C_{\psi_i} - C_{\phi_i} S_{\psi_i} & C_{\phi_i} S_{\theta_i} C_{\psi_i} + S_{\phi_i} S_{\psi_i} \\ C_{\theta_i} S_{\psi_i} & S_{\phi_i} S_{\theta_i} S_{\psi_i} + C_{\phi_i} C_{\psi_i} & C_{\phi_i} S_{\theta_i} S_{\psi_i} - S_{\phi_i} C_{\psi_i} \\ -S_{\theta_i} & S_{\phi_i} C_{\theta_i} & C_{\phi_i} C_{\psi_i} \end{bmatrix}$$

$$\Pi_i = \begin{bmatrix} 1 & S_{\phi_i} T_{\theta_i} & C_{\phi_i} T_{\theta_i} \\ 0 & C_{\phi_i} & -S_{\phi_i} \\ 0 & \frac{S_{\phi_i}}{C_{\theta_i}} & \frac{C_{\phi_i}}{C_{\theta_i}} \end{bmatrix}$$

式中: S_{\cdot} 表示“ \cdot ”的正旋, C_{\cdot} 表示“ \cdot ”的正旋, T_{\cdot} 表示“ \cdot ”的正切。模型(1)可以描述任意可作为刚体的无人机,更详细的无人直升机、四旋翼等无人机的模型描述请参考文献^[7, 28]。

为了便于描述编队控制,给出图论的相关基础知识。对于一个有向图 $G: (\Xi, \epsilon, \mathbf{A})$; Ξ 是点集,每个点表示一架无人机; ϵ 表示无人机之间通信的边的集合; $\mathbf{A} = [a_{ij}]_{n \times n}$ 表示邻接矩阵。 $a_{ij} = 1$ 表示无人机 i 可以通过无线通信接收无人机 j 的信息, $a_{ij} = 0$, 表示不能。另外定义 leader-follower 编队的 Laplacian 矩阵为 $\mathbf{H} = \mathbf{L} + \mathbf{B}$, 其中 $l_{ii} = \sum_{j \neq i} a_{ij}$ 且 $l_{ij} = -a_{ij}, i \neq j$, $\mathbf{B} = \text{diag}\{b_1, \dots, b_n\}$, $d_i = 1$ 表示 leader 无人机可以通过无线通信向无人机 i 传递信息, $d_{ij} = 0$ 表示不能。

下面给出无人机编队的几种常见的假设。

假设 1 无人机所受的干扰是有界的, 干扰的变化速度也是有界的。

假设 2 leader 无人机的状态是光滑的, 其位置三阶导数存在且有界。

2 无人机编队控制算法设计

图 1 给无人机编队控制结构图。为实现多无人机编队飞行到任意目的地, 采用 leader-follower

编队方式。对每架无人机设计连续的外环鲁棒控制器跟踪 leader 无人机,通过姿态解算得到期望姿

态指令,设计连续的内环鲁棒控制器跟踪期望姿态指令。

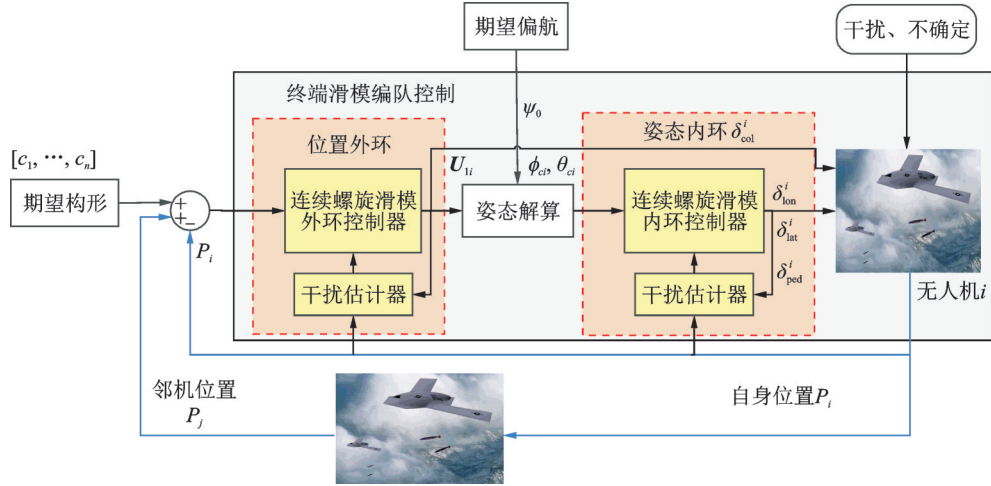


图1 无人机编队结构图

Fig. 1 Structure of UAV formation

2.1 外环观测器和控制器综合设计

定义位置编队误差 e_{P_i} 和速度编队误差 e_{V_i} 分别为

$$e_{P_i} = \sum_{j=0}^n a_{ij} (P_j - P_i + c_j - c_i)$$

$$e_{V_i} = \sum_{j=0}^n a_{ij} (V_j - V_i) \quad i=0, 1, \dots, n \quad (2)$$

式中: $c_i \in \mathbb{R}^3$ 表示无人机 i 和 leader 无人机的期望位置。 $e_P = [e_{P_1}, \dots, e_{P_n}]^T$, $e_V = [e_{V_1}, \dots, e_{V_n}]^T$ 。

为了补偿干扰对无人机 i 编队速度的影响,设计二阶精确微分器如式(3)所示,来估计干扰,并将干扰估计输出到控制器式中

$$\dot{\hat{P}}_i = -k_i \frac{1}{3} \gamma_1 \text{sign}^{\frac{2}{3}}(\tilde{P}_i) + \hat{V}_i$$

$$\dot{\hat{V}}_i = -k_i \frac{2}{3} \gamma_2 \text{sign}^{\frac{1}{3}}(\tilde{P}_i) + \xi_i + H U_{1i} \quad (3)$$

$$\dot{\xi}_i = -k_i \frac{2}{3} \gamma_3 \text{sign}(\tilde{P}_i)$$

式中, $\tilde{P}_i = \hat{P}_i - e_{P_i}$, $k_i > 0$, $\gamma_k > 0$, $k=1, 2, 3$, \hat{P}_i 为 e_{P_i} 的估计, \hat{V}_i 为 e_{V_i} 的估计。

受文献[23]启发,本文首次将单变量连续螺旋滑模方法推广到多变量,并应用在无人机编队控制。基于连续螺旋滑模方法,对无人机 i 设计外环控制器如式(4)所示

$$U_{1i} = g e_3 - l_i \frac{2}{3} \lambda_1 \text{sign}^{\frac{1}{3}}(e_{P_i}) - l_i \frac{1}{2} \lambda_2 \text{sign}^{\frac{1}{2}}(\hat{V}_i) + \eta_i$$

$$\dot{\eta}_i = -l_i \lambda_3 \text{sign}(e_{P_i}) - l_i \lambda_4 \text{sign}(\hat{V}_i) \quad (4)$$

式中, $l_i > 0$, $\lambda_k > 0$, $k=1, \dots, 4$ 。

定理 1 针对无人机刚体模型(1)的位置和速度方程,满足假设 1 和假设 2,设计观测器为式(3)和

控制器为式(4),那么选取合适的控制器增益,可以实现有限时间编队,即

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e_P = 0, \lim_{t \rightarrow \infty} e_V = 0 \quad (5)$$

稳定性分析

定义 $\tilde{\xi} = \xi - H \left(1_n \otimes \ddot{x}_0 - g e_3 - \frac{\Delta_v}{m} \right)$, $\xi = [\xi_1, \dots, \xi_n]^T$, $\tilde{\xi} = [\tilde{\xi}_1, \dots, \tilde{\xi}_n]^T$ 。那么观测误差方程如式(6)所示

$$\dot{\tilde{P}} = -k_i^{\frac{1}{3}} \gamma_1 \text{sign}^{\frac{2}{3}}(\tilde{P}) + \tilde{V}$$

$$\dot{\tilde{V}} = -k_i^{\frac{2}{3}} \gamma_2 \text{sign}^{\frac{1}{3}}(\tilde{P}_i) + \tilde{\xi}$$

$$\dot{\tilde{\xi}} = -k_i^{\frac{2}{3}} \gamma_3 \text{sign}(\tilde{P}) - H \left(1_n \otimes \ddot{x}_0 - \frac{\Delta_v}{m} \right) \quad (6)$$

为了便于阅读,我们将所有无人机的状态组成列向量,变化如下 $P = [P_1, \dots, P_n]^T$, \tilde{P} 类同于 $\tilde{\xi}$ 。类似地, $V = [V_1, \dots, V_n]^T$, \tilde{V} 类同于 $\tilde{\xi}$ 。

对式(2)求导,并将式(6)和式(4)代入,那么编队误差方程变为

$$\dot{e}_P = e_V$$

$$\dot{e}_V = H(1_n \otimes \dot{P}_0 - g e_3 + U_1) =$$

$$H \left(1_n \otimes \dot{P}_0 - l^{\frac{2}{3}} \lambda_1 \text{sign}^{\frac{1}{3}}(e_P) - l^{\frac{1}{2}} \lambda_2 \text{sign}^{\frac{1}{2}}(\tilde{V} + e_V) + \eta \right)$$

$$\dot{\eta}_i = -l_i \lambda_3 \text{sign}(e_{P_i}) - l_i \lambda_4 \text{sign}(\tilde{V}_i + e_{V_i})$$

$$\dot{\tilde{P}}_i = -k_i^{\frac{1}{3}} \gamma_1 \text{sign}^{\frac{2}{3}}(\tilde{P}_i) + \tilde{V}_i$$

$$\dot{\tilde{V}}_i = -k_i^{\frac{2}{3}} \gamma_2 \text{sign}^{\frac{1}{3}}(\tilde{P}_i) + \tilde{\xi}_i$$

$$\dot{\tilde{\xi}}_i = -k_i^{\frac{2}{3}} \gamma_3 \text{sign}(\tilde{P}_i) - H \left(1_n \otimes \ddot{x}_0 - \frac{\Delta_v}{m} \right) \quad (7)$$

式中, $\tilde{V}_i = \hat{V}_i - e_{V_i}$ 表示速度编队误差的估计误差。选取合适的参数, 即选取 $k_i \frac{2}{3} \gamma_3 > \left\| H \left(I_n \otimes x_0 - \frac{\dot{\Delta}_v}{m} \right) \right\|$, 那么方程(7)中 $\tilde{\xi}_i$ 可以实现渐近稳定。进而通过选择 $k_i, \gamma_2, k_i, \gamma_1$ 为正实数, 可以实现 \tilde{P}_i, \tilde{V}_i 渐近稳定。那么编队误差方程(7)变为文献[15]形式, 参考文献中选取原则, 我们可以实现编队误差渐近稳定。在第 3 部分可知可以满足无人机编队误差收敛到零。限于篇幅有限, 不给出详细证明步骤, 这将是未来的一个研究方向。

2.2 内环观测器和控制器综合设计

首先根据外环控制量计算得出期望姿态角。

期望姿态角可有 $U_{li} = fRe_3$, 和 $R^T R = I_3$, 仿照文献[7], 得到无人 i 的期望滚转角 ϕ_{di} 、期望俯仰角 θ_{di} 如式(8)所示

$$\begin{aligned} \phi_{di} &= \arcsin \left(\frac{S_{\psi_i} U_{xi} - C_{\psi_i} U_{yi}}{\sqrt{(U_{xi}^2 + U_{yi}^2 + U_{zi}^2)}} \right) \\ \theta_{di} &= \arctan \left(\frac{C_{\psi_i} U_{xi} + S_{\psi_i} U_{yi}}{U_{zi}} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

无人直升机 i 的期望偏航角 ψ_{di} , 由期望轨迹给出。期望姿态角为 $\Theta_{di} = [\phi_{di}, \theta_{di}, \psi_{di}]$ 。

为了实现对期望姿态角的平滑跟踪, 采用滤波技术^[7], 获得期望姿态角的光滑逼近 $\Theta_{ci} = [\phi_{ci}, \theta_{ci}, \psi_{ci}]$ 。滤波方程为

$$\dot{\Theta}_{ci} = -\frac{\Theta_{di} - \Theta_{ci}}{\tau_i} - \frac{r_i(\Theta_{di} - \Theta_{ci})}{\|\Theta_{di} - \Theta_{ci}\|^{\frac{1}{2}} + m_i} \quad (9)$$

式中, $\tau_i > 0, r_i > 0, m_i > 0$ 。参数选取规律参考文献[7]。

针对内环模型(1), 将其变换成二阶积分形式

$$\begin{aligned} \dot{\Theta}_i &= \Pi_i \Omega_i \\ (\Pi_i \Omega_i)' &= \Pi_i (-S(\Omega_i) J_i \Omega_i + \Delta_{\Omega_i}) + \dot{\Pi}_i \Omega_i + \Pi_i M_i \end{aligned} \quad (10)$$

为了补偿干扰对无人机 i 编队速度的影响, 设计二阶鲁棒微分器如式(11)所示, 来估计干扰, 并将干扰估计输出到控制器式中。

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{\Theta}}_i &= -\bar{k}_i \frac{1}{3} \bar{\gamma}_1 \text{sign}^{\frac{2}{3}}(\tilde{\Theta}_i) + \hat{\Omega}_i \\ \dot{\hat{\Omega}}_i &= -\bar{k}_i \frac{2}{3} \bar{\gamma}_2 \text{sign}^{\frac{1}{3}}(\tilde{\Theta}_i) + \xi_{2i} - \\ &\quad \Pi_i S(\Omega_i) J_i \Omega_i + \dot{\Pi}_i \Omega_i + \Pi_i M_i \\ \dot{\xi}_{2i} &= -\bar{k}_i \frac{2}{3} \bar{\gamma}_3 \text{sign}(\tilde{\Theta}_i) \end{aligned} \quad (11)$$

式中: $\tilde{\Theta}_i = \hat{\Theta}_i - \Theta_i; \tilde{\Omega}_i = \hat{\Omega}_i - \Pi_i \Omega_i; \bar{k}_i > 0; \bar{\gamma}_k >$

$0, k=1, 2, 3$ 。 $\hat{\Theta}_i$ 为 Θ_i 的估计, $\hat{\Omega}_i$ 为 $\Pi_i \Omega_i$ 的估计。

定义姿态跟踪误差为 $e_{\Theta_i} = \Theta_{di} - \Theta_i$ 。采用和外环相同的思路, 基于连续终端滑模方法, 内环控制器设计为

$$\begin{aligned} M_i &= S(\Omega_i) J_i \Omega_i - \Pi_i^{-1} \dot{\Pi}_i \Omega_i + \\ &\quad \Pi_i^{-1} \left(-\bar{l}_i \frac{2}{3} \bar{\lambda}_1 \text{sign}^{\frac{1}{3}}(e_{\Theta_i}) - \bar{l}_i \frac{1}{2} \bar{\lambda}_2 \text{sign}^{\frac{1}{2}}(\hat{\Theta}_i) + \dot{\eta}_i \right) \\ \dot{\eta}_i &= -\bar{l}_i \bar{\lambda}_3 \text{sign}(e_{\Theta_i}) - \bar{l}_i \bar{\lambda}_4 \text{sign}(\hat{\Theta}_i) \end{aligned} \quad (12)$$

式中: $\bar{l}_i > 0, \bar{\lambda}_k > 0; k=1, \dots, 4$ 。参数选取合适时, 可以满足编队稳定。

定理 2 针对无人机刚体模型(1)的姿态角和角速度方程, 满足假设 1, 设计观测器为式(11)和控制器为式(13), 那么选取合适的控制器增益, 姿态角可以有限时间, 即

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e_{\Theta_i} = 0 \quad (13)$$

式中, 姿态误差方程(13)式在选取合适的参数后, 是成立的。具体分析过程参考外环观测器和控制器综合设计。整个闭环系统的稳定性由多时间尺度^[7]来保证。

3 仿真实验

为了验证所设计的控制算法的有效性, 本文设计并搭建了一个软件在环仿真演示平台, 分别基于 Matlab 离线环境和仿真平台实时环境对控制算法进行了仿真实验。

3.1 仿真平台设计

仿真平台总体架构如图 2 所示, 包括快速原型单元、上位机单元和实验演示单元 3 大部分。为保证仿真的实时性, 基于以太网实现平台上述功能单元之间的数据通信。

(1) 快速原型单元

快速原型单元基于分布式硬件架构与数学模型实时解算来模拟无人机编队。分布式硬件环境由多台实时仿真机组成, 每台仿真机均采用个人电脑(Personal computer, PC)架构与 Simulink Real-Time(SLRT)实时内核。根据中央处理机(Central processing unit, CPU)性能不同, 每台实时仿真机可运行一架或多架无人机的实时仿真程序, 并基于客户端/服务器(Client/Server, C/S)模式与上位机中心节点进行数据通信, 从而实现了无人机编队的快速原型仿真。

(2) 上位机单元

上位机是仿真平台的“中枢”, 负责算法开发与集成、数据采集与分发等功能的实现。上位机软件框架如图 3 所示。

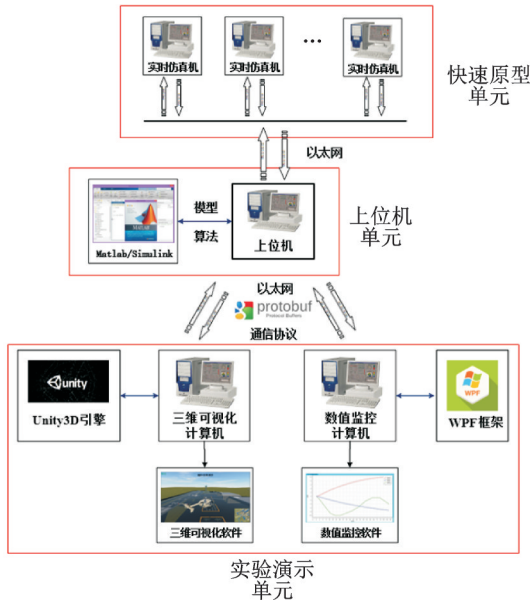


图2 仿真平台总体架构

Fig. 2 Overall architecture of simulation platform

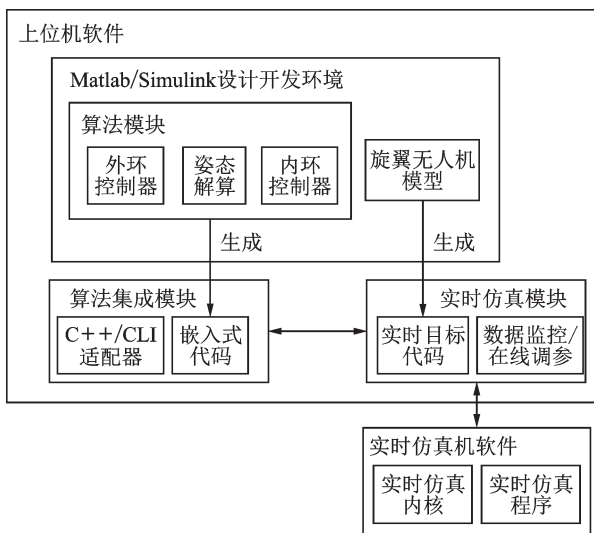


图3 上位机软件框架

Fig. 3 Host computer software architecture

首先,在上位机 Matlab/Simulink 环境中开发无人机编队仿真程序,包括旋翼无人机模型、外环控制器、内环控制器和姿态解算模块,并完成 Simulink 离线仿真测试。其次,通过代码生成技术将上述模块转换成嵌入式代码,开发算法集成模块,基于动态链接库与 C++/通用语言架构(Common language infrastructure, CLI)实现上位机算法模块集成;开发实时仿真模块,生成无人机模型实时仿真程序下载到实时仿真机中运行,基于数据监控与在线调参功能与快速原型交互,从而构成了无人机编队控制实时 SIL 仿真回路。上位机按照实际控制系统的采样频率进行迭代,在每一步迭代中,首先基于数据监控功能获取无人机的状态,再调用算法模块解算得到控制器的输出,最后

基于在线调参功能修改模型的输入参数。

(3) 实验演示单元

实验演示单元基于仿真数据驱动,通过三维视图、数值曲线等方式,实时演示无人机编队仿真的动态过程。平台实验演示单元主要包括数值监控软件与三维可视化软件。数值监控软件基于窗口展示框架(Windows presentation foundation, WPF)开发人机界面,显示无人机编队二维构型,以数值和曲线形式显示单机姿态、高度、速度等仿真信息。基于 Unity 3D 引擎开发三维可视化软件,基于 3dsmax 建立无人机、机场、陆地地形等三维模型资源,并搭建仿真场景。平台基于 Protobuf 开发统一的应用层网络通信协议,使得实验演示功能的扩展变得简单,也使得现有软件的接入变得容易,方便多人协作。

3.2 MATLAB 数值仿真验证

根据上文所述仿真平台软件开发流程,首先设计并开发具有标准接口的无人机模型、控制器等 Simulink 模块,并在 Matlab 环境下进行离线仿真测试。外环和内环干扰分别为 $\sin t$ (m/s^2), $\sin t$ (rad/s^2)。无人机模型参数根据文献[6]选取,参数具体设置如下。

无人机模型参数: $m=8.2\text{ kg}$, $g=9.81\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, $J=[0.18, 0.34, 0.28]^T\text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 。

观测器参数: $k_i=1$, $\gamma_1=\gamma_2=0.1$, $\gamma_3=2$, $\bar{k}_i=1$, $\bar{\gamma}_1=\bar{\gamma}_2=0.1$, $\bar{\gamma}_3=2$ 。

外、内环控制器参数: $l_i=1$, $\lambda_1=\lambda_2=0.1$, $\lambda_3=\lambda_4=2$, $\bar{l}_i=1$, $\bar{\lambda}_1=\bar{\lambda}_2=0.01$, $\bar{\lambda}_3=\bar{\lambda}_4=1$; 滤波器参数: $\tau=0.01$, $m_i=0.01$, $r_i=10$ 。

基于 Matlab 的数值仿真结果如图 4,无人机 2~5 可以形成间距为 150 的正方形编队,无人机 1 在它们之后。仿真结果如图 4—6 所示。

从仿真结果图 4 来看,所设计的状态观测器和编队控制器是有效的,无人机编队能够完成期望构型。图 5, 6 说明了所设计的编队控制算法可以在 8 s 左右形成编队队形。8 s 之后编队误差一直收

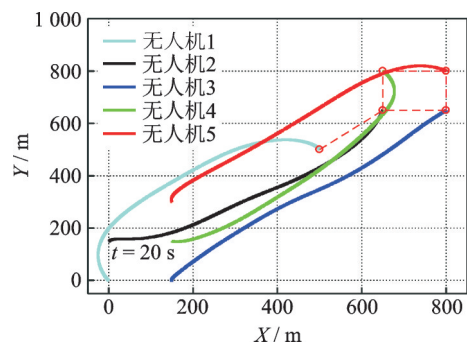


图4 无人机编队生成二维平面图

Fig. 4 Two-dimensional plane graph of UAV formation generation

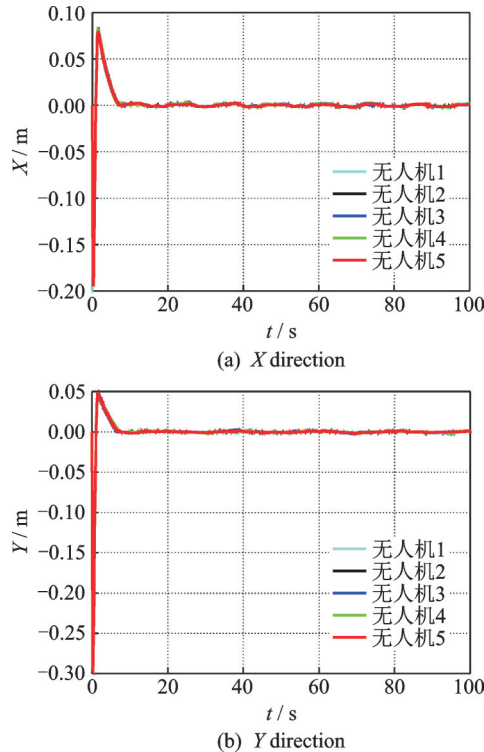


图 5 5架无人机X和Y方向编队误差

Fig. 5 Formation error of 5 UAVs in X and Y directions

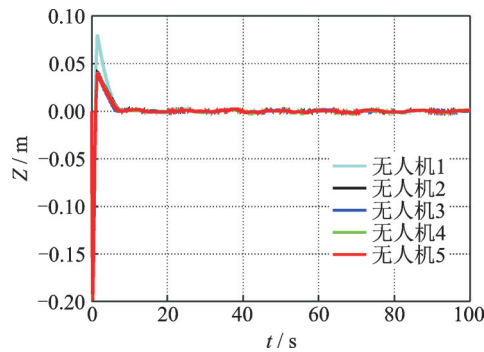


图 6 5架无人机Z方向编队误差

Fig. 6 Formation error of 5 UAVs in Z direction

敛,说明在8s后队形一直保持不变。

3.3 基于平台的仿真结果

生成上述模块的嵌入式C/C++代码,在实时环境下进行SIL仿真验证。同时,基于平台的实验演示软件界面进行仿真结果监控。

图7为平台实验演示软件界面,分别演示了虚拟场景下的4架无人机编队三维构型,以及单机速度曲线信息,仿真结果进一步说明了控制算法在实时环境下的有效性,同时也验证了仿真平台功能的可靠性。

4 结 论

本文设计了一个状态观测器和连续终端滑模控制器综合的控制策略,对外界干扰进行了抑制和对速度进行了精确估计。通过数值仿真验证了算

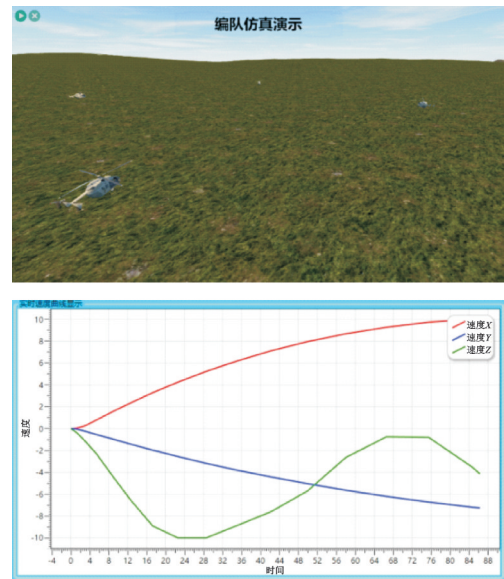


图 7 实验演示软件界面

Fig. 7 Software interface of experiment demonstration

法的有效性,又基于软件在环实时仿真平台进行了视景演示。未来计划增加完整的闭环稳定性分析过程,并将控制算法嵌入实际控制系统中,完成硬件在环演示验证。

参考文献:

- [1] SCHOERLING D, KLEECK C V, FAHIMI F, et al. Experimental test of a robust formation controller for marine unmanned surface vessels[J]. Autonomous Robots, 2010, 28(2): 213-230.
- [2] 邱华鑫,段海滨.从鸟群群集飞行到无人机自主集群编队[J].工程科学学报,2017,39(3):317-322. QIU Huaxin, DUAN Haibin. From collective flight in bird flocks to unmanned aerial vehicle autonomous swarm formation[J]. Chinese Journal of Engineering, 2017, 39(3): 317-322.
- [3] 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 Qun, WANG Dandan, SHAO Shikai, et al. Research status and development of multi UAV coordinated formation flight control[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(3): 1-14.
- [4] 牧彬,米征,盛凯,等.BP神经网络PID控制器在无人机编队飞行中的应用[J].测控技术,2017,36(4):66-69. MU Bin, MI Zheng, SHENG Kai, et al. Application of BP neural network PID controller in UAV formation flight[J]. Measurement & Control Technology, 2017, 36(4): 66-69.
- [5] KUMAR B A, JIANG Ju, ZHEN Ziyang. Quadcopter UAV modeling and automatic flight control design[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 34(6): 627-636.
- [6] 段海滨,邱华鑫,范彦铭.基于捕食逃逸鸽群优化的

- 无人机紧密编队协同控制[J]. 中国科学:技术科学, 2015, 45(6): 559-572.
- DUAN Haibin, QIU Huaxin, FAN Yanming. Unmanned aerial vehicle close formation cooperative control based on predatory escaping pigeon-inspired optimization[J]. Scientia Sinica: Technological Sciences, 2015, 45(6): 559-572.
- [7] WANG D, ZONG Q, TIAN B, et al. Neural network disturbance observer-based distributed finite-time formation tracking control for multiple unmanned helicopters[J]. ISA Transactions, 2018, 73: 208-226.
- [8] ZOU A M, KUMAR K D. Neural network-based adaptive output feedback formation control for multi-agent systems[J]. Nonlinear Dynamics, 2012, 70(2): 1283-1296.
- [9] TIAN B, LU H, ZUO Z, et al. Fixed-time leader-follower output feedback consensus for second-order multiagent systems[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2018, 99: 1-6.
- [10] SHAH S, DEY D, LOVETT C, et al. AirSim: High-fidelity visual and physical simulation for autonomous vehicles[M]//Field and Service Robotics. UK: Springer, 2018.
- [11] 彭辉, 相晓嘉, 吴立珍, 等. 有人机/无人机协同任务控制系统[J]. 航空学报, 2008, 39(S1): 135-141.
- PENG Hui, XIANG Xiaojia, WU Lizhen, et al. Cooperative mission control system of a manned vehicle and unmanned aerial vehicle[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 39(S1): 135-141.
- [12] HOW J, KUWATA Y, KING E. Flight demonstrations of cooperative control for UAV teams[C]//AIAA 3rd Unmanned Unlimited Technical Conference, Workshop and Exhibit. Chicago, Illinois, USA: AIAA, 2004; 2004-6490.
- [13] RASMUSSEN S J, MITCHELL J W, CHANDLER P R, et al. Introduction to the MultiUAV2 simulation and its application to cooperative control research [C]//Proceedings of the American Control Conference. [S.l.]: IEEE, 2005: 4490-4501.
- [14] XU J, PARK H, JEONG K, et al. TMO-HILS architecture for real-time control system[C]//International Conference on Control. Seoul, South Korea: IEEE, 2007.
- [15] GARCIA R, BARNES L. Multi-UAV simulator utilizing X-plane[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2010, 57(1/2/3/4): 393-406.
- [16] MENG W, HU Y, LIN J, et al. ROS+unity: An efficient high-fidelity 3D multi-UAV navigation and control simulator in GPS-denied environments[C]//Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Yokohama, Japan: IEEE, 2015.
- [17] 周昊, 覃征, 邢剑宽. 基于多Agent的多无人机协同决策算法仿真平台设计[J]. 系统仿真学报, 2012(3): 587-593.
- ZHOU hao, QIN Zheng, XING Jiankuan. Simulation platform of cooperative algorithm for UAVs based on multi-agent system[J]. Journal of System Simulation, 2012(3): 587-593.
- [18] 石仁星. 基于Simulink RTW的分布式实时仿真关键技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2011.
- [19] 冯磊. 基于RTW的分布式实时仿真系统研究与实现[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2005.
- [20] 孔繁峨, 陈宗基. 基于RTW和VxWorks的飞行控制系统实时仿真[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(11): 2455-2457.
- KONG Fan'e, CHEN Zongji. Real-time simulation of flight system based on RTW and VxWorks[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(11): 2455-2457.
- [21] 向孝龙. 基于VxWorks的无人机快速原型仿真技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2014.
- [22] 廖新涛. 基于快速原型的无人机仿真技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2015.
- [23] 吴成富, 段晓军, 吴佳楠, 等. 基于Matlab和VxWorks的无人机飞控系统半物理仿真平台研究[J]. 西北工业大学学报, 2005, 23(3): 337-340.
- WU Chengfu, DUAN Xiaojun, WU Jianan, et al. A rapidly constructed HIL simulation platform including non manual real time simulation software for UAV flight control research[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2005, 23(3): 337-340.
- [24] 陈欣, 夏云程, 董小虎. 一种全数字半物理飞行控制实时仿真系统[J]. 南京航空航天大学学报, 2001, 33(2): 200-202.
- CHEN Xin, XIA Yuncheng, DONG Xiaohu. A digital hardware-in-the-loop real-time simulation system for flight control[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2001, 33(2): 200-202.
- [25] 耿通奋. 无人机实时飞行仿真平台设计[J]. 南京航空航天大学学报, 2009, 41(S2): 34-37.
- GENG Tongfen. Real-time simulation system for UAV[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009, 41(S2): 34-37.
- [26] 郭鸿昌, 陈欣, 洪春霞, 等. 基于网络的无人机实时仿真系统软件[J]. 南京航空航天大学学报, 2009, 41(S1): 38-42.
- GUO Hongchang, CHEN Xin, HONG Chunxia, et al. Real-time simulation system software for UAV based on net[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009, 41(S1): 38-42.
- [27] SANCHEZ T, MORENO J A, FRIDMAN L M. Output feedback continuous twisting algorithm[J]. Automatica, 2018, 96: 298-305.
- [28] FERNANDO T, CHANDIRAMANI J, LEE T, et al. Robust adaptive geometric tracking controls on SO(3) with an application to the attitude dynamics of a quadrotor UAV[C]//Decision and Control and European Control Conference. Orlando, USA: IEEE, 2011: 7380-7385.