

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2022.05.012

基于PX4飞控的多旋翼无人机编队跟踪系统设计

姚洪斌, 张民, 胡淦敏

(南京航空航天大学自动化学院, 南京 211100)

摘要:为解决单架无人机续航能力不足、执行任务单薄、应用场合受限等问题,目前多无人机协同跟踪具有极其重要的研究价值。以多旋翼无人机为研究对象,设计了一种基于PX4飞控的多旋翼无人机协同编队系统。利用飞控底层软件,将设计的制导律进行移植,通过ROS系统对无人机进行外部控制,各个僚机和长机之间能够实时获取其他无人机位置,然后通过控制器得到指令速度,从而形成预设跟踪编队。仿真实验结果表明,整个编队系统对目标的跟踪精确有效,并且所设计的制导律可以在PX4飞控架构下实现对地面目标的编队跟踪,提高了多旋翼编队跟踪系统的稳定性。

关键词:多旋翼无人机;编队跟踪;编队协同

中图分类号:TP24

文献标志码:A

文章编号:2095-8110(2022)05-0111-07

Design of Multi-Rotor UAV Formation Tracking System Based on PX4 Flight Control

YAO Hong-bin, ZHANG Min, HU Gan-min

(College of Automation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211100, China)

Abstract: At present, multi-UAV cooperative tracking has extremely important research value in solving the problems of insufficient endurance ability, weak task execution and limited application occasions of single UAV. Taking the multi-rotor UAV as the research object, this paper designs a multi-rotor UAV cooperative formation system based on PX4 flight control. Using the flight control underlying software, the designed guidance law is transplanted, and the UAV is externally controlled through the ROS. Each wingman and captain can obtain the position of other UAVs in real time, and then obtain the command speed through the controller. The simulation results show that the tracking target of the whole formation system is accurate and effective, and the designed guidance law can realize the formation tracking of ground targets under PX4 flight control architecture, and improve the stability of multi-rotor formation tracking system.

Key words: Multi-rotor UAV; Formation tracking; Formation coordination

0 引言

近年来,无人机编队飞行已经成为控制领域的

一个研究热点^[1]。无人机编队飞行是指2架或者2架以上的无人机,接到任务指令后,可以根据当时任务阶段自主进行队形的集结、变化、保持、重构等

收稿日期:2021-10-11;修订日期:2021-12-03

基金项目:航空科学基金(20181352010);国防重点实验室基金(61425050402)

作者简介:姚洪斌(1996-),男,硕士研究生,主要从事先进飞行控制技术方面的研究。

通信作者:张民(1973-),男,副研究员,主要从事无人机飞行控制与仿真及导弹控制方面的研究。

功能变化,同时也包括飞行任务的规划和分配,整个无人机群在执行任务过程中体现出高度协同性和一致性。但在实际工程应用中发现,单架无人机会因为续航能力有限导致任务效率较低,严重制约了其应用场景和性能优势^[2]。通过多无人机的相互协作,无人机群飞行可以有效地延伸无人机的任务执行范围,提升执行任务的完成度和成功率,综合性能与单机相比有了极大的提高,应用范围和任务场景也不断拓展。国内目前对无人机编队飞行的研究基本上聚焦在协同控制方法的研究和实验室仿真阶段。国外 E. Frew 等利用李雅普诺夫矢量场并基于视线角的制导策略,实现多无人机协同跟踪目标,最终使无人机稳定收敛在极限环上做周期运动^[3]。国内杨祖强等建立 tau 制导矢量场,设计了基于 standoff 的多机协同跟踪算法,利用相位调整并结合人工势场法避碰,以达到多机协同跟踪目的^[4]。另外,固定翼飞机虽然具有高速巡航能力,但是对于起降跑道和平飞高度要求较高。多旋翼无人机具有垂直起降、空中悬停、低空低速飞行等独特飞行技能,且具有很强的灵活性,被广泛应用于地图航拍、农业喷洒、侦查测绘等领域^[5]。

本文提出了一种基于 PX4 飞控的通过长机领航的四旋翼无人机编队系统,将基于距离变化率的协同定距跟踪制导律成功应用于多旋翼无人机平台,设计的协同制导律公式简洁,所需要的传感器参数信息大大减少,且整个系统的复杂度不随飞行器数量的增加而增加,最终可以使多架无人机自主形成预设编队并保持编队,能够对地面目标进行跟踪,从而提高任务效率,最大化发挥多旋翼无人机的性能。同时,应用机器人操作系统(Robot Operating System, ROS)搭建编队软件系统,实现了多无人机之间的信息交互,最后在 Gazebo 仿真环境中进行测试,并分析了无人机群的飞行数据,从而验证了本系统的稳定性和可行性^[6]。

1 问题描述

1.1 制导策略与任务需求

无人机协同跟踪是无人机编队在探测范围内发现地面目标后,编队成员之间可通过链路通信获得相邻无人机的状态信息和地面目标的信息,进而对地面目标进行有效的协同跟踪^[7]。无人机飞行控制系统由内回路和外回路构成。本文直接利用 PX4 开源飞控系统底层架构作为内回路控制无人机姿态,同时基

于设计的编队制导算法进行位置控制和速度控制作为外回路的输入,以响应外回路给出的制导指令^[8]。目标几乎以恒定的速度在相当平坦的地面上移动,并且在默认条件下无人机的速度高于目标速度^[9]。理想情况下,所有无人机在执行跟踪任务过程中,都会保持在同一水平高度上,所以这里仅考虑固定高度上的二维制导问题。制导策略如图 1 所示。

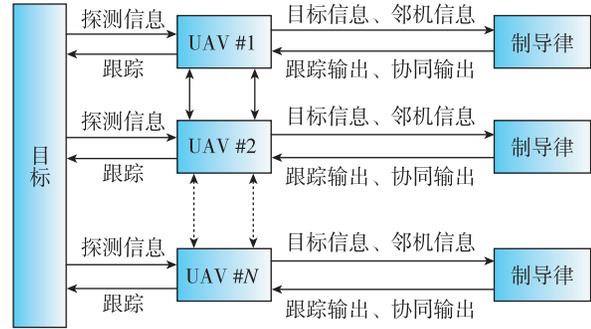


图 1 制导策略示意图

Fig. 1 Schematic diagram of guidance strategy

任务目标可理解为地面目标与无人机同时处于同一个二维平面上,多架无人机在跟踪制导律作用下逐渐收敛到构成以目标为圆心、半径为 ρ_d 的圆编队进行稳定跟踪。在跟踪编队初步成形后,协同制导律开始作用,最终 N 架无人机平均分布于轨迹圆上。

1.2 无人机建模

建立无人机模型的系统状态空间,其描述形式为

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \quad (1)$$

$$\mathbf{x} = [\phi, \theta, \psi, p, q, r, u, v, w, x_g, y_g, h]^T$$

其中, \mathbf{x} 为状态向量;后面各项依次为滚转角、俯仰角、偏航角、滚转角速度、俯仰角速度、偏航角速度、机体坐标系 3 个坐标轴的空速分量、横向位移、侧向位移、高度; \mathbf{u} 作为控制向量,且作为执行机构的操纵量,经过底层飞控的控制器,最后都通过电机产生的力矩作为输出。在制导问题研究中,将无人机状态向量简化为 $\mathbf{x} = [x, y, z, \theta, \phi, v]^T$, 其运动模型为

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{y}(t) \\ \dot{z}(t) \\ \dot{\theta}(t) \\ \dot{\phi}(t) \\ \dot{v}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v(t) \cos\theta(t) \cos\psi(t) \\ v(t) \cos\theta(t) \sin\psi(t) \\ v(t) \sin\theta(t) \\ u_\theta(t) \\ u_\phi(t) \\ u_v(t) \end{bmatrix} \quad (2)$$

以上为无人机三维运动模型,考虑无人机定高度飞行,则 $\dot{z}(t)=0, \dot{\theta}(t)=0$ 。进一步,无人机的二维质点运动学模型可描述为以下形式^[10-11]

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{y}(t) \\ \dot{\psi}(t) \\ a(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v(t) \cos\psi(t) \\ v(t) \sin\psi(t) \\ u_\psi(t) \\ u_v(t) \end{bmatrix} \quad (3)$$

2 编队算法

当跟踪地面目标时,无人机的飞行状态分为顺时针飞行和逆时针飞行。在本文中,为了便于分析,采用前者的飞行方式。本文使用如式(4)所示的无人机跟踪地面目标制导律^[12]

$$\dot{\psi} = -\frac{K_t \dot{\rho} + v^2}{\rho_d v} \quad (4)$$

其中, v 表示无人机的速度; ρ_d 表示无人机与目标的期望距离; $\dot{\rho}$ 表示距离变化率; ψ 表示无人机航向角; $\dot{\psi}$ 表示偏航角速率; K_t 表示无人机的增益。

由图 2 中的无人机间运动关系,得方程

$$r_{i,i-1} = 2\rho_d \sin \frac{\theta_{i,i-1}}{2} \quad (5)$$

$$\dot{\psi}_{i,i-1} = \omega_i - \omega_{i-1} = \frac{v_i - v_{i-1}}{\rho_d} \quad (6)$$

其中,2架相邻无人机 i 与 $i-1$ 间距离用 $r_{i,i-1}$ ($i \pm n$ 在范围内, $n \in N$)表示,相邻2架无人机轨迹所对圆心角用 $\theta_{i,i-1}$ 表示,由几何关系可得 $\theta_{i,i-1} = \psi_{i,i-1} = \psi_i - \psi_{i-1}$ 。

编队的协同制导律形式为^[13]

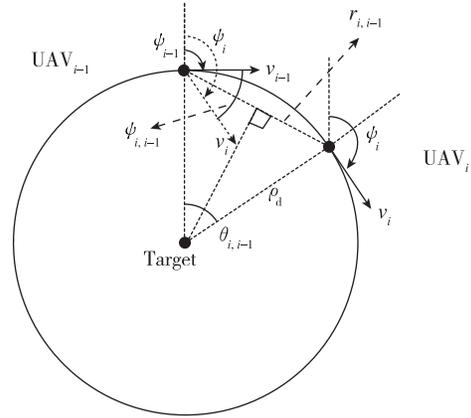


图 2 相邻无人机运动关系示意图
Fig. 2 Schematic diagram of motion relationship between adjacent UAVs

$$v_i = v_{i-1} - k_v \left(r_{i,i-1} - 2\rho_d \sin \frac{\pi}{N} \right) \sqrt{\frac{(\rho_i + \rho_{i-1})^2 - r_{i,i-1}^2}{\rho_i \rho_{i-1}}} \quad (7)$$

由文献[8]中的李雅普诺夫稳定性分析可知,当 $r_{i,i-1} \rightarrow 2\rho_d \sin \frac{\pi}{N}$ 时,无人机编队系统在该制导律作用下,可以使各无人机均匀分布在圆周上。

控制结构框图如图 3 所示,以跟随无人机为例,跟随无人机自身产生的控制指令经过处理,在无人机编队系统中输入的分别是各个跟随无人机实时采集到的位置信息和偏航角信息,经过飞控底层得到的领航无人机信息作为编队协同律的输入,两个控制律的输出融合后共同发送给飞控,输出为底层飞控姿态控制器计算的控制量。

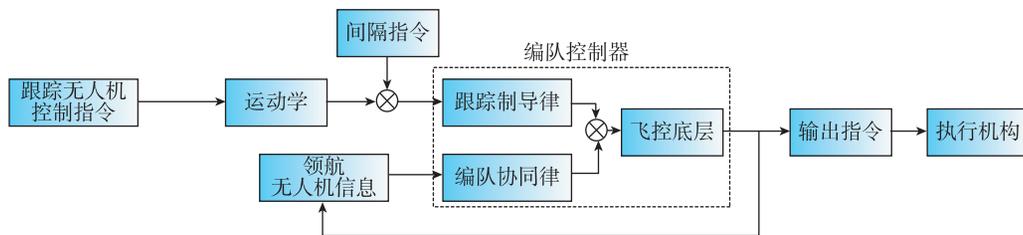


图 3 编队控制结构框图
Fig. 3 Block diagram of formation control structure

3 编队系统设计

整体编队实现采用图 4 所示的分层结构表示。该结构总共 4 层,分别为进行外部控制的应用层、负责通信的通信层、融合数据的飞控层和各传感器模型的接口层。

应用层通过规划整体编队队形,使机群中的每个成员达到期望的位置和速度,并通过上文中的编队算法计算出每架无人机在其机体坐标系下的期望姿态。通信层可以利用系统程序设计基于开源 ROS 的分布式框架,为无人机提供通信服务^[14]。首先组建一个局域网,将应用层计算出的期望速

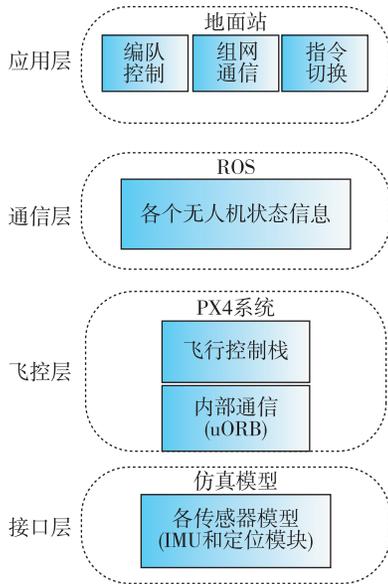


图4 编队系统层次结构

Fig. 4 Hierarchy of formation system

度、滚转角、俯仰角等信息以及各无人机成员的自身状态信息作为话题节点,在飞控层与应用层之间传递。飞控层利用开源的PX4飞控负责无人机的信息融合,飞行控制栈是导航、制导、控制算法的集合,可以提供姿态解算、控制量分配、电机舵机控制等,使无人机在稳定飞行的同时速度可以快速收敛到期望的值,保证无人机飞行的姿态稳定且提供无人机速度和高度保持,从而控制无人机达到期望的跟踪队形。接口层主要是由无人机模型和各传感器模型构成。4个层次共同组成了无人机编队控制系统。本文主要在通信层和应用层搭建Gazebo仿真环境,利用ROS结合c++进行程序设计。

GAZEBO是一款能够提供高保真度的物理模拟的图形界面(见图5),并且可以自定义增加场景,即使在复杂的环境下,仍然能够准确地模拟出机器人的行为,是一款对用户和程序都非常友好的物理模型仿真软件^[15]。本文系统使用这款软件对现实场景进行还原,并在其中进行无人机编队算法的验证。在GAZEBO仿真环境中,通过配置四旋翼无人机尺寸、质量和相关传感器、控制器等模型参数,得到基于PX4的iris四旋翼仿真模型,并使其与实际无人机基本保持一致,对其编号以模拟多架无人机在实际飞行环境中的效果。其次,修改仿真时运行的launch文件,通过标签的方式添加无人机的属性,改变无人机的个数、起始位置等,每个无人机都具有各自的用户数据报协议(User Datagram Protocol,UDP)端口,并且与其mavros包的UDP通信端口一一对应,设置好后即

可结合其他ROS包中的launch文件进行编队控制实验。启动后,可以在仿真环境中观察到多架无人机形成队形且保持队形进行预期活动。

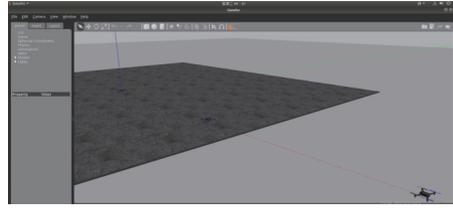


图5 GAZEBO仿真界面

Fig. 5 GZEBO simulation interface

ROS^[16]在此无人机编队系统中,可作为无人机起飞、切换模式等命令的接收者,也可以作为经过内部相关程序包计算后的数据处理者以及制导信息的发布者。通过微型空中飞行器链路通信协议(Micro Air Vehicle Link, MAVLink)和其可扩展通信节点mavros,在编队中的无人机会向服务器发布自己的相关状态信息,同时,若其想要接收相邻无人机的相关状态,可以通过订阅话题的方式进行获取,与其建立通信关系,即可达成目的。内部ROS接收来自发布节点以及各个传感器的信息,计算无人机的制导信息,并将此信息传递给飞控,进而控制无人机飞行姿态,其中涉及的订阅/发布的ROS话题如表1所示。同时,设计了能够观察各机详细数据和进行指令切换的小型地面站,如图6所示。

表1 订阅/发布的ROS话题

Tab. 1 ROS topics subscribed/published

mavros 消息名称	说明
mavros/local_position/pose(订阅)	获取无人机位置
mavros/local_position/velocity(订阅)	获取无人机三轴速度
mavros/setpoint_attitude/attitude(发布)	控制期望姿态
mavros/setpoint_position/local(发布)	控制期望位置
mavros/setpoint_velocity/cmd_vel(发布)	控制期望速度

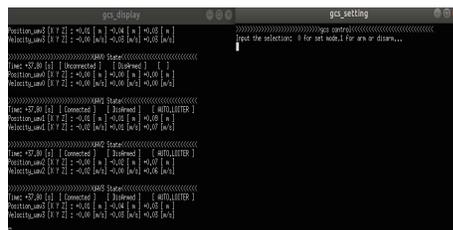


图6 小型地面站

Fig. 6 Small ground station

4 飞行仿真验证

通过仿真实验,无人机的跟踪轨迹如图 7 所示。

4 架无人机最终能通过外部指令切换飞行模式在各自位置起飞,每架无人机起飞的水平间隔为 8m,起飞后先平飞,之后搜索到目标后进入跟踪阶段,在 5m 的高度对目标进行跟踪,跟踪过程中 4 架无人机在跟踪圆轨迹中保持均匀分布,飞行过程仿真曲线如图 8 所示。

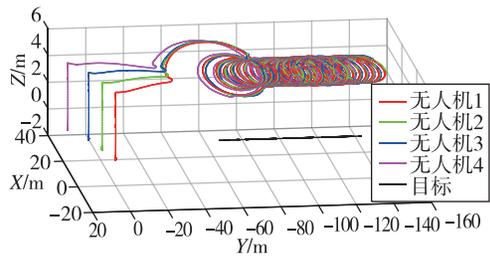
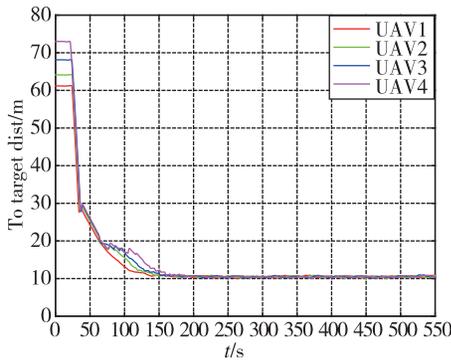
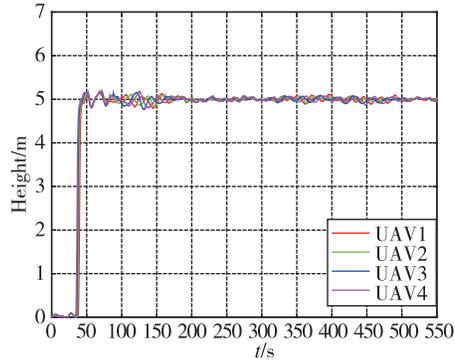


图 7 无人机协同跟踪目标轨迹

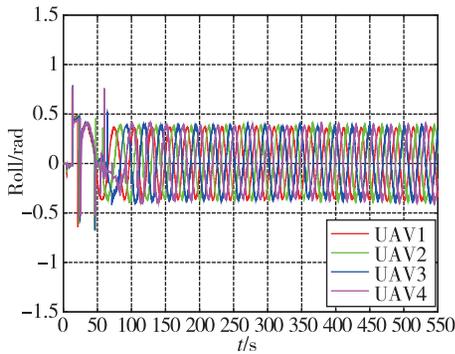
Fig. 7 UAV cooperative tracking target trajectory



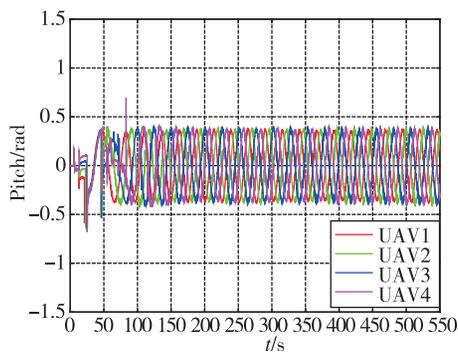
(a) 无人机对目标距离



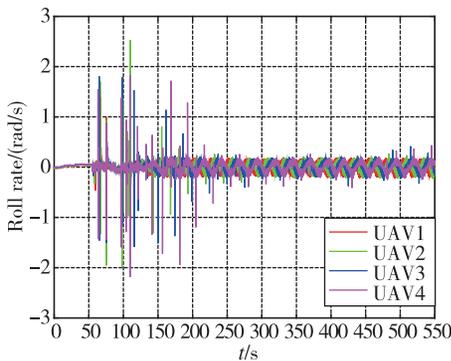
(b) 无人机高度变化



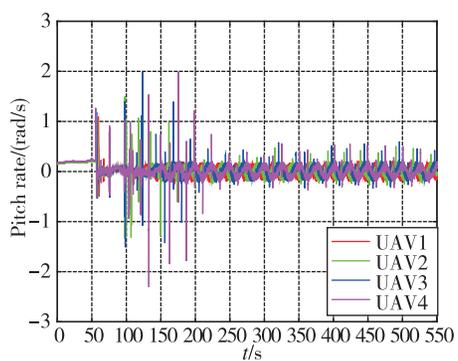
(c) 滚转角变化曲线



(d) 俯仰角变化曲线



(e) 滚转角速率变化



(f) 俯仰角速率变化

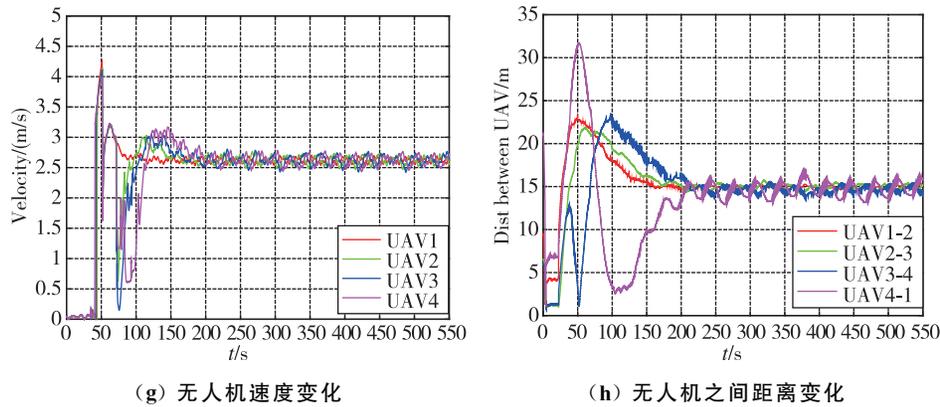


图8 过程仿真曲线

Fig. 8 Process simulation curve

观察过程仿真曲线结果可知:无人机能够根据制导律给出的指令很好地跟踪地面移动目标,对目标距离稳定在 10m,无人机在跟踪过程中在 2.5~2.7m/s 的速度范围内变化,高度偏差都在 $\pm 0.1\text{m}$ 以内,跟踪过程保证了 4 架无人机之间的距离保持在 15m 左右;同时,姿态也能根据指令及时调整,俯仰角和滚转角都能达到良好的控制效果,验证了本文无人机编队系统可以有效且稳定地跟踪目标。

5 结论

本文采用开源的 PX4 四旋翼无人机飞控,围绕编队协同跟踪问题开展工作,主要结论为:

1) 利用领航者-跟随者编队方式与 ROS 分布式模型的优点,设计了编队协同控制系统,ROS 系统将控制底层与上层应用相互分离,隐藏各自细节,具有良好的互操作性。

2) 将基于距离变化率的制导律结合 PX4 飞控的位置和速度控制,在 GAZEBO 环境中搭建多架四旋翼实际模型,对编队控制系统的效果及功能进行编队仿真验证。

3) 仿真结果表明,本文提出的编队跟踪策略和算法可以有效地跟踪地面目标,具有工程应用价值。

4) 同时本系统也具有较好的拓展性,在后续实验中可以通过对无人机和机载设备选型,进而对本文提出的编队算法进行实物验证。

参考文献

[1] Zheng Z, Cai S. A collaborative target tracking algorithm for multiple UAVs with inferior tracking capabilities[J]. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 2021, 22(10): 1334-1350.

[2] 徐俊,王茂森,戴劲松,等. 四旋翼无人机的编队飞行控制系统设计[J]. *机械设计与制造*, 2018(3): 263-266.

Xu Jun, Wang Maosen, Dai Jinsong, et al. The design of control system for formation flight of quadrotor UAV [J]. *Machinery Design and Manufacture*, 2018(3): 263-266(in Chinese).

[3] Frew E, Lawrence D A, Morris S. Coordinated stand-off tracking of moving targets using Lyapunov guidance vector fields[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2008, 31(2): 290-306.

[4] 魏扬,张登成,张艳华,等. 无人机自主编队制导律设计[J]. *飞行力学*, 2016, 34(2): 37-41.

Wei Yang, Zhang Dengcheng, Zhang Yanhua, et al. Guidance laws for UAVs autonomous formation[J]. *Flight Dynamics*, 2016, 34(2): 37-41(in Chinese).

[5] 樊琼剑,杨忠,方挺,等. 多无人机协同编队飞行控制的研究现状[J]. *航空学报*, 2009, 30(4): 683-691.

Fan Qiongjian, Yang Zhong, Fang Ting, et al. Research status of coordinated formation flight control for multi-UAVs [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2009, 30(4): 683-691(in Chinese).

[6] Xie Y, Han L, Dong X, et al. Bio-inspired adaptive formation tracking control for swarm systems with application to UAV swarm systems[J]. *Neurocomputing*, 2021, 453: 272-285.

[7] Zhou W, Liu Z, Li J, et al. Multi-target tracking for unmanned aerial vehicle swarms using deep reinforcement learning[J]. *Neurocomputing*, 2021, 466: 285-297.

[8] 张民,田鹏飞,陈欣. 一种无人机定距盘旋跟踪制导律及稳定性证明[J]. *航空学报*, 2016, 37(11): 3425-3434.

Zhang Min, Tian Pengfei, Chen Xin. UAV guidance law for circumnavigating and tracking ground target

- and its stability proof[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2016, 37(11): 3425-3434 (in Chinese).
- [9] Petersen M, Samuelson C, Beard R W. Target tracking and following from a multirotor UAV[R]. *Current Robotics Reports*, 2021.
- [10] 黄坤. 无人机编队跟踪地面目标制导方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
Huang Kun. Research on guidance algorithm of ground target tracking for UAV formation [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019 (in Chinese).
- [11] 田鹏飞. 无人机跟踪地面目标制导律研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
Tian Pengfei. Research on guidance law of UAV to track ground target [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017 (in Chinese).
- [12] 张民, 夏卫政, 黄坤, 等. 基于 Leader-Follower 编队的无人机协同跟踪地面目标制导律设计[J]. *航空学报*, 2018, 39(2): 230-242.
Zhang Min, Xia Weizheng, Huang Kun, et al. Guidance law for cooperative tracking of a ground target based on leader-follower formation of UAVs[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2018, 39(2): 230-242 (in Chinese).
- [13] 林云. 多无人机协同对地跟踪制导方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.
Lin Yun. Research on guidance algorithm of cooperative ground target tracking for multiple UAVs [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020 (in Chinese).
- [14] Sokolov M, Gabdullin A, Afanasyev I, et al. 3D modeling and simulation of a crawler robot in ROS/Gazebo [C]// *Proceedings of 4th International Conference on Control, Mechatronics and Automation*, 2016: 61-65.
- [15] Dobrokhodov V N, Kaminer I I, Jones K D, et al. Vision-based tracking and motion estimation for moving targets using small UAVs [C]// *Proceedings of AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*. USA: Keystone, 2006: 1-12.
- [16] Guo X, Liu H, Dai H. Mobile robot target tracking system based on deep learning [C]// *Proceedings of 2020 2nd International Conference on Electronic Science and Automation Control*, 2020.

(编辑: 孟彬)