

doi: 10.7690/bgzdh.2024.09.020

基于四旋翼无人机的协同跟踪系统

胡淦敏, 张 氏, 吴亚妃

(南京航空航天大学自动化学院, 南京 210016)

摘要: 为解决单架无人机由于续航等条件制约导致任务效率低下的问题, 对多无人机协同方面进行研究。搭建一套基于四旋翼无人机的飞行综合验证平台, 完成硬件系统的搭建和软件系统的设计, 并通过实验来验证平台的稳定性和可靠性。结果表明: 该平台操作简便、成本低廉、扩展性好, 具有较好的工程价值。

关键词: 多旋翼无人机; 编队跟踪; 编队协同; ROS

中图分类号: V279 **文献标志码:** A

Cooperative Tracking System Based on Quadrotor UAV

Hu Ganmin, Zhang Min, Wu Yafei

(College of Automation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to solve the problem of low mission efficiency of single UAV due to the constraints of endurance and other conditions, the cooperation of multiple UAVs is studied. Build a set of flight integrated verification platform based on quadrotor UAV, complete the design of hardware system and software system, and verify the stability and reliability of the platform through experiments. The results show that the platform has the advantages of simple operation, low cost, good expansibility and good engineering value.

Keywords: multi rotor UAV; formation tracking; formation coordination; ROS

0 引言

随着近年来无人机应用的发展, 各种领域对于无人机的需求逐渐增加。这些领域基本都有一个共同的应用: 目标跟踪。而随着跟踪任务的复杂化, 单架无人机逐渐因为性能限制而导致无法完成跟踪任务, 逐渐考虑无人机协同完成跟踪任务^[1-2]。目前, 国内外在协同控制方法和仿真领域对无人机编队飞行作了大量研究^[3-5], 但各种无人机协同控制方法仍需要实际飞行实验来进行检验。由于固定翼无人机的飞行从成本、场地要求、安全性上来讲比较不便, 而固定翼无人机具有垂直起降、空中悬停、低空低速飞行等独特的飞行能力, 且具有很强的灵活性^[6]。笔者主要研究飞行过程的制导律, 可以忽略起飞和降落阶段; 因此, 考虑选用低成本的四旋翼无人机来搭建实验平台。

笔者以验证无人机协同跟踪制导律为目标, 基于四旋翼无人机设计一种简单且便于开发扩展的综合飞行实验验证系统^[7], 然后将基于距离变化率的协同定距跟踪制导律成功应用在四旋翼无人机平台上, 最终使多架无人机实现互相协同并均可保持对地面目标进行定距跟踪, 充分发挥四旋翼无人机的性能。

1 问题描述

1.1 制导策略与任务需求

无人机协同跟踪是指无人机通过机间通信来进行地面目标状态分享, 通过获取相邻无人机的位置信息来进行协同响应^[8], 从而能够更好地对目标进行跟踪。由于笔者着重对制导算法的研究, 而不触及对无人机内回路的控制; 因此, 直接采用PX4开源飞控系统底层架构作为内回路控制无人机姿态, 而笔者所验证的制导算法是通过位置控制和速度控制作为输入来控制无人机。目标在几乎平坦的地面上运动, 并且默认无人机的速度远大于目标速度, 理想情况下, 队列中无人机在跟踪过程中, 是保持在同一水平高度的; 因此, 该制导律可以化简为固定高度的2维制导问题, 制导策略如图1所示。

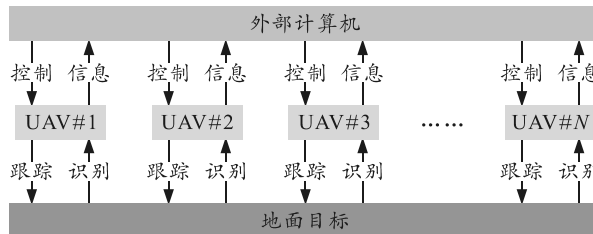


图1 制导策略

通俗来讲, 实质的任务目标为无人机能够在地

收稿日期: 2024-05-17; 修回日期: 2024-06-20

基金项目: 上海航天科技创新基金(SAST2021-053)

第一作者: 胡淦敏(1998—), 男, 江西人, 硕士。

面目标上方一定高度，通过响应制导律的输出，成功的跟随目标的移动，收敛到该高度上的以目标为圆心、半径为设定跟踪半径的轨迹圆上运动。并且编队之间由于协同制导律作用，能够大致均匀分布在该轨迹圆上，实现对目标的协同跟踪。

1.2 无人机建模

首先建立无人机模型的系统状态空间，其描述形式可以表示为：

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

$\mathbf{x} = [\phi, \theta, \psi, p, q, r, u, v, w, x_g, y_g, h]^T$ ，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、滚准角速度、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} 为控制向量，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。由于主要研究制导问题，因此可以将无人机状态向量进一步简化为： $\mathbf{x} = [x, y, z, \theta, \psi, v]^T$ 。其运动模型为：

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

以上为无人机 3 维运动模型，考虑无人机定高度飞行，则 $\dot{z}(t) = 0$ ， $\dot{\theta}(t) = 0$ 。可以进一步考虑无人机的 2 维质点运动模型，描述形式如下：

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

1.3 目标跟踪制导律

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。为便于分析，采用前者的飞行方式，如图 2 所示。

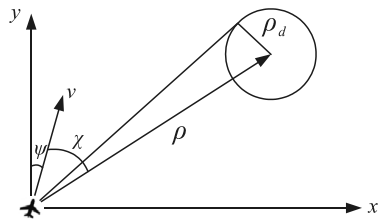


图 2 无人机定距跟踪

无人机跟踪地面目标制导律如下^[9-10]：

$$\dot{\psi} = \begin{cases} -k\dot{\rho} - v/\rho_d & \rho \geq \rho_d \\ -k\rho_d\dot{\rho}/\rho - v/\rho_d & \rho < \rho_d \end{cases} \tag{4}$$

式中： v 为无人机的速度； ρ_d 为无人机与目标的期望距离； $\dot{\rho}$ 为距离变化率； ψ 为无人机的航向角； $\dot{\psi}$ 为无人机的偏航角速率； k 为无人机的增益。

1.4 协同跟踪制导律

相邻无人机运动关系如图 3 所示。

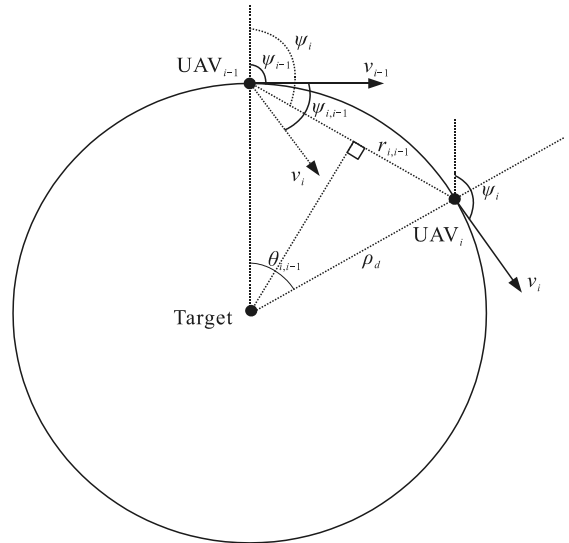


图 3 相邻无人机运动关系

由上图中的无人机间运动关系，得方程：

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

$$\dot{\psi}_{i,i-1} = w_i - w_{i-1} = \frac{v_i - v_{i-1}}{\rho_d} \tag{6}$$

式中： $r_{i,i-1}$ ($i \pm n$ 在范围内， $n \in N$) 为 2 架相邻无人机 i 与 $i-1$ 间距离； $\theta_{i,i-1}$ 为相邻 2 架无人机轨迹所对圆心角，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：

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

使用李雅普诺夫进行稳定性分析可知，当无人机系统在该制导律的作用下，可使各无人机均匀分布在圆周上运行^[11-13]。

控制结构如图 4 所示，在该系统中，输入为无人机实时采集到的位置信息；同时，相邻无人机机间通信所获取的邻机信息作为协同制导律的输入，2 个制导律共同作用下，制导输出发送给飞控端进行响应以实现无人机的控制。

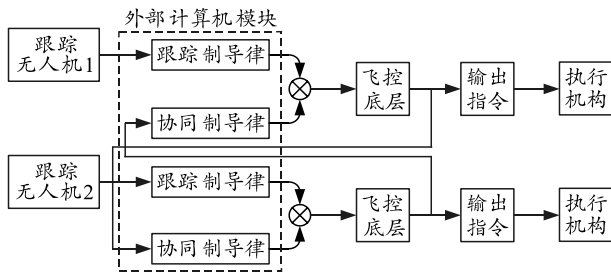


图 4 控制结构

2 系统设计

首先对单个的四旋翼无人机进行分析；为利于扩展，其余无人机默认具有相同的结构。整个系统结构中主要包括定位模块、外部控制模块、通信模块以及飞行控制模块；同时，笔记本作为地面控制模块，可远程控制四旋翼无人机的运动并观察无人机实时飞行状态^[14]。

在四旋翼无人机飞行过程中，定位模块中使用 GPS、气压计得到位置信息后在飞控中进行数据融合，利用修正加速度和位置偏差得出更准确的位置实现对无人机的位置估计。通信模块既有空地通信，也有控制端-执行端通信，同时更有机间通信。通过此模块作用才能对整个无人机编队实现整体控制。外部计算机模块是整个系统的重点，将机载计算机与飞控连接后，需要在该计算机中进行环境安装和程序开发，在外部计算机上运行所设计的跟踪制导程序，结果计算后制导输出为无人机的位置和速度控制。通过 mavros 包提供的功能将该期望值作为消息发布给底层飞控。飞行控制器模块提供了传感器数据处理、导航制导、飞行控制等重要功能，是将外部控制模块计算出的指令转化为执行机构输出的最后一环，为无人机的稳定飞行提供了保障^[15]。无人机系统组成框图如图 5 所示。

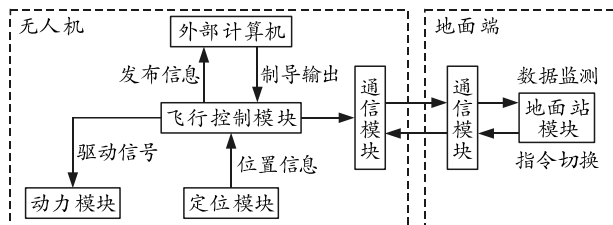


图 5 单架无人机系统组成

2.1 系统硬件模块

平台所使用的无人机为四旋翼无人机，该无人机可分为软件与硬件 2 大模块。各自类型的硬件与软件整合到一起是个繁琐的工程，不仅要考虑硬件的适用性，而且要兼顾软件的兼容性，即需要全盘考虑来进行硬件选型和软件安装。

平台所采用的四旋翼无人机如图 6 所示，其主要组成有机架、动力模块、飞行控制器、GPS 模块、通信模块和机载计算机等。

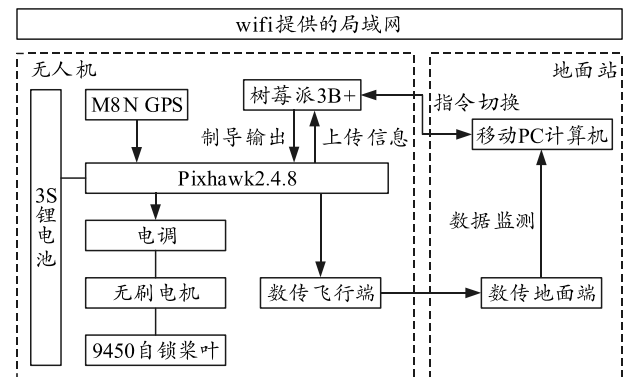


图 6 单架无人机硬件组成

主要硬件模块如下：

- 1) 机架。选用基于 450 mm 轴距的大疆 F450 机架。该机架成本低、载重足够。
- 2) 动力模块。选择 9450 自锁桨叶、搭配 kV 值为 2 212 的无刷电机、最大电流为 20 A 的好盈铂金电调以及 5 200 mAh 容量的 3 S 锂电池。
- 3) 飞行控制器。选用 2.4.8 版本的 Pixhawk。该飞控集合了各种传感器，同时能很好地响应制导输入并输出控制执行机构。
- 4) GPS 模块。选用 M8N GPS 作为无人机的 GPS 模块，可为无人机提供经度、纬度、高度、水平/垂向经度因子等重要信息。
- 5) 通信模块。选用乐迪 AT9S 遥控器搭配 R9DS 遥控器接收机。
- 6) 机载计算机。由于要求机载计算机体积小、重量轻，性能优越等，选用树莓派 3B+ 作为机载计算机。

2.2 系统软件模块

软件组成如图 7 所示。

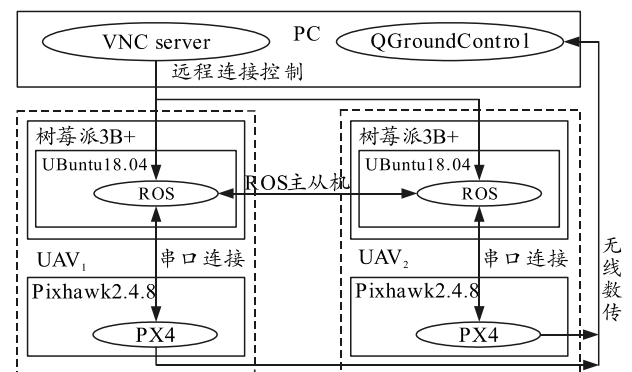


图 7 协同跟踪系统软件组成

主要软件模块如下：

1) VNC。该软件主要功能为在笔记本外部连接树莓派，以便于对树莓派进行操作。

2) QGC 地面站。地面站是对无人机进行监控的重要平台，能够监测所设计的算法在无人机上的运行情况，将无人机的状态信息反馈给地面人员，除此之外地面站也可以设定地理围栏，确保实验过程的安全。

3) 飞行控制器。控制器功能实现主要通过分析以下方面展开：

① 无人机拥有可靠的飞行控制系统可以进行姿态控制，为实现稳定飞行提供保障。

② 无人机控制采用顶层和底层分离设计，利用底层实现位置和速度控制器，同时能提供一个使外部程序访问的接口。

③ 能与外部计算机和无人机进行通信。

其中开源的PX4 飞控提供的功能已满足这几项需求。

4) 机间通信。机间通信的要求为编队中无人机能够发布自身状态信息并获得其余无人机的状态信息，即在编队内建立一个多对多通信网络。查询相关资料后，发现配置 ROS 的主从机即可以满足需求。

3 实验与分析

为验证所搭建飞行验证平台，在该平台上进行飞行实验验证无人机协同跟踪制导律。由于实验环境的限制，将目标设置为虚拟目标。首先，以 1 号无人机为坐标原点，以机头方向为 x 轴方向建立坐标系，2 号无人机初始位置为 $x=-5, y=0$ ，目标初始位置为 $x=10, y=-20$ ，目标以 $y=2\cos(\pi t/400)x$ 进行变速曲线运动。跟踪半径定为 10 m 。其中，为避免无人机发生碰撞等安全事故，1 号无人机高度定为 3 m ，2 号无人机高度定为 5 m 。

首先为无人机分配静态 IP 地址，以 1 号无人机为长机，作为 ROSMaster 结点。1 号无人机静态 IP 分配为 $192.168.43.109$ ，2 号无人机的静态 IP 分配为 $192.168.43.174$ ，地面站 IP 地址分配为 $192.168.43.70$ 。地面站通过 vnc 远程连接 2 个机载计算机，分别运行外部控制结点文件。无人机起飞完成跟踪任务后，对保存在 pixhawk 飞控上的飞行日志进行分析，结果如图 8 所示。

如图 9 所示，2 架无人机在目标移动过程中，能够保持对地面目标进行跟踪，且由于协同制导律的影响，使无人机编队能够均匀地分布在目标的跟

踪轨迹圆上。

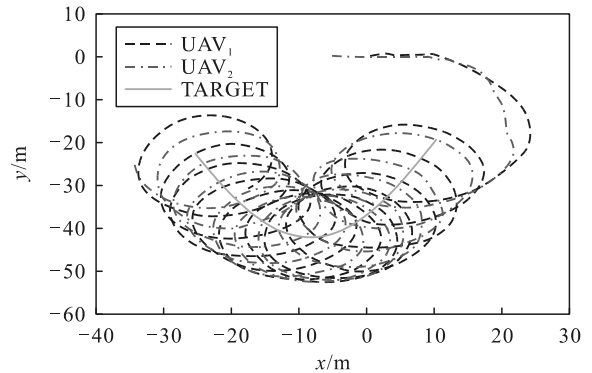
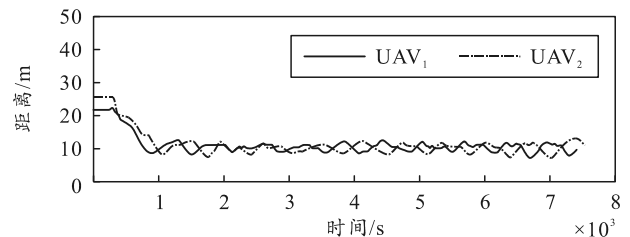
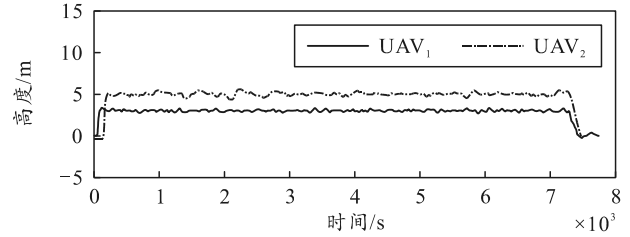


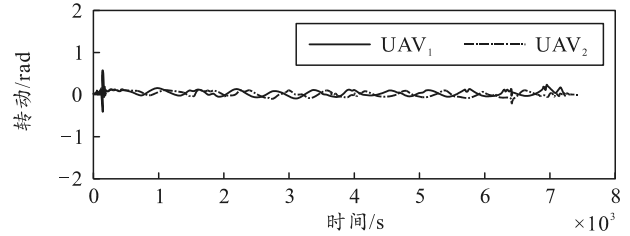
图 8 无人机协同跟踪目标轨迹



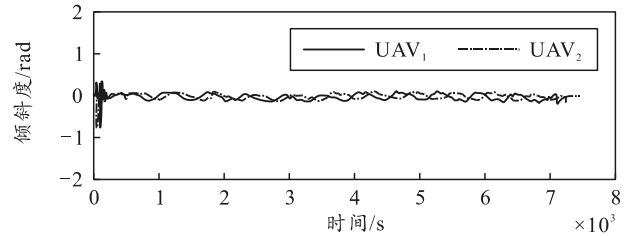
(a) 无人机对目距离



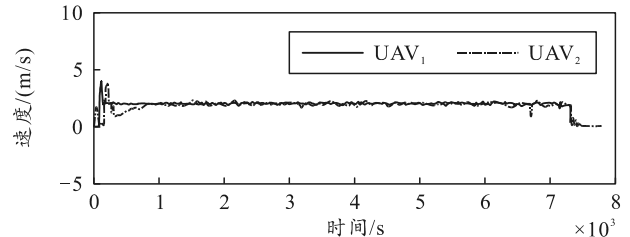
(b) 无人机高度变化



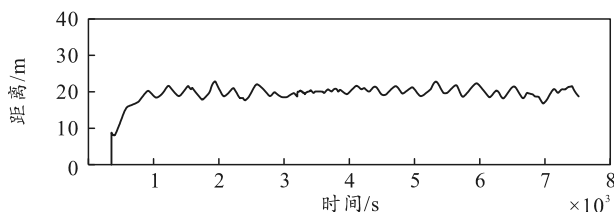
(c) 滚转角变化曲线



(d) 俯仰角变化曲线



(e) 无人机速度变化



(f) 无人机间距变化

图9 无人机协同跟踪过程曲线

由于本次实验主要的目标为验证跟踪制导律，因此主要观察无人机的跟踪状态信息，起飞状态和降落状态在此不再赘述。观察过程实验曲线结果可知：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，相对目标距离在 10 m 左右振荡，在跟踪过程中，1 号无人机速度稳定在 2 m/s 左右，而 2 号无人机速度因协同制导律作用导致振荡较 1 号大，但仍在可控范围内，高度偏差虽有振荡但影响不大，跟踪过程保证了 2 架无人机之间的距离保持在 20 m 左右，为 2 倍的跟踪半径；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，能够验证该无人机协同跟踪制导律在笔者所设计的综合飞行实验验证平台上成功运行，可以有效且稳定地跟踪目标。

4 结束语

笔者围绕基于四旋翼无人机开发的综合验证平台开展了目标协同跟踪制导律的验证工作，主要贡献为：

1) 根据实际需求，对实验平台进行了硬件选型和软件安装。

2) 成功将协同跟踪制导律应用在四旋翼上从而对制导律实际控制效果进行了实验验证。

3) 实验结果表明，该协同跟踪制导律可以有效地跟踪地面目标，具有实际的工程应用价值。

4) 本系统具有优秀的拓展性，后续可以扩展多架无人机，进而对编队集结、队形变换等算法进行实际飞行验证。

参考文献：

[1] ZHENG Z, CAI S C. 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] ZHOU W H, LIU Z H, LI J, et al. Multi-target tracking for unmanned aerial vehicle swarms using deep reinforcement learning[J]. *Neurocomputing Volume*, 2021, 466: 285-297.

[3] 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.

[4] 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.

[5] 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.

[6] 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.

[7] MARK PETERSEN, CHAD SAMUELSON, RANDAL W. Beard Target Tracking and Following from a Multirotor UAV[J]. *Current Robotics Reports*, 2021.

[8] XIE Y X, HAN L, DONG X W, et al. Bio-inspired adaptive formation tracking control for swarm systems with application to UAV swarm systems[J]. *Neurocomputing Volume*, 2021, 453: 272-285.

[9] 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.

[10] 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.

[11] 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.

[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.

[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.

[14] MAXIM S, ROMAN L, AIDAR G, et al. 3D modelling and simulation of a crawler robot in ROS/Gazebo[P]. *Control, Mechatronics and Automation*, 2016: 61-65.

[15] DOBROKHODOV V, KAMINER I, JONES K, et al. Vision-based Tracking and Motion Estimation for Moving Targets Using Small UAVs[C]// *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*. USA: Keystone, 2006: 1-12.