

基于多智能体协同的无人机编队控制研究

甘良棋, 董超

引用本文

甘良棋, 董超. [基于多智能体协同的无人机编队控制研究](#)[J]. 计算机科学, 2024, 51(11A): 240100105-7.

GAN Liangqi, DONG Chao. [Study on Unmanned Aircraft Formation Control Based on Multi-agent Collaboration](#) [J]. Computer Science, 2024, 51(11A): 240100105-7.

相似文章推荐 (请使用火狐或 IE 浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

[基于深度确定性策略梯度与注意力Critic的多智能体协同清障算法](#)

Multi-agent Cooperative Algorithm for Obstacle Clearance Based on Deep Deterministic Policy Gradient and Attention Critic

计算机科学, 2024, 51(7): 319-326. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.230600129>

[计及风电的发电商报价多智能体模型](#)

Multi-agent Based Bidding Strategy Model Considering Wind Power

计算机科学, 2024, 51(6A): 230600179-8. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.230600179>

[基于值函数分解的多智能体深度强化学习方法研究综述](#)

Survey of Multi-agent Deep Reinforcement Learning Based on Value Function Factorization

计算机科学, 2024, 51(6A): 230300170-9. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.230300170>

[基于平均一致协议的分布式自适应多智能体聚集控制](#)

Distributed Adaptive Multi-agent Rendezvous Control Based on Average Consensus Protocol

计算机科学, 2024, 51(5): 242-249. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.230300159>

[基于智能规划的多智能体强化学习算法](#)

Multi-agent Reinforcement Learning Algorithm Based on AI Planning

计算机科学, 2024, 51(5): 179-192. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.230800099>

基于多智能体协同的无人机编队控制研究

甘良棋 董超

南京航空航天大学电子信息工程学院/集成电路学院 南京 211106

工业和信息化部电磁频谱空间认知动态系统重点实验室 南京 211106

摘要 无人机的应用在各方面越来越受到大家的重视,特别是应用在复杂多变的战场中,其具有独特的优势。但是战场中单架次无人机作战能力非常有限,只能完成单一任务且效率较低。多无人机编队协同,可以充分发挥无人机编队的优势,实现更广泛的任务覆盖、更高效的任务执行能力。首先分析了多智能体组网、无人机编队协同动态组网的应用背景和应用场景,提出了“空-天-低空-陆地”联合通信的域,可以实现不同空间层次之间的信息数据传输,达到战场统一指挥和协同作战,提高作战效率;然后,分析之后建立了单个无人机的数学模型,设计了单个无人机的飞行控制器,且通过仿真得出翻滚角、俯仰角和偏航角响应时间分别为 0.5 s、0.3 s 和 2.5 s;之后,基于 AirSim 插件、Matlab/Simulink、Python 等工具设计了无人机编队协同控制系统,可以实现任务场景仿真、各无人机飞行数据的收集和处理;最后,为了解决各个无人机之间的数据交互和决策等问题,设计了协同通信控制模块,并且给出了具体的硬件原理、数据交互的通信协议等,通过仿真和实验完成了无人机编队协同控制系统,为现代战争中趋于无人作战提供一定的理论和实际参考意义。

关键词: 多无人机编队协同;多智能体;联合通信的域;空-天-低空-陆地;协同通信控制模块

中图分类号 TN929

Study on Unmanned Aircraft Formation Control Based on Multi-agent Collaboration

GAN Liangqi and DONG Chao

College of Electronic and Information Engineering/ College of Integrated Circuits, Nanjing University of Aeronautics and Astro Nautics, Nanjing 211106, China

Key Laboratory of Dynamic Cognitive System of Electromagnetic Spectrum Space, Ministry of Industry and Information Technology, Nanjing 211106, China

Abstract The application of unmanned aerial vehicles(UAVs) is receiving more and more attention in all aspects, especially in the complex and changing battlefield, where they have unique advantages. However, single-flight UAV operations in the battlefield are very limited in capability and can only accomplish a single task with low efficiency. Multi-UAV formation coordination can give full play to the advantages of UAV formation and realize wider mission coverage and more efficient mission execution capability. Firstly, the application background and application scenarios of multi-agent networking and UAV formation cooperative dynamic networking are analyzed. The domain of “air-sky-low-altitude-land” joint communication is proposed, which can realize the information between different spatial levels. The joint communication domain of “air-sky-low-altitude-land” is proposed, which can realize the transmission of information and data between different spatial levels, achieve unified command and cooperative operation on the battlefield, and improve the combat efficiency. Then, the mathematical model of a single UAV is established after analysis, and the flight controller of a single UAV is designed and the response times of roll angle, pitch angle and yaw angle are 0.5 s, 0.3 s and 2.5 s respectively through simulation. After that, the UAV formation cooperative control system is designed based on tools such as AirSim plug-in, Matlab/Simulink, Python, which can realize the simulation of mission scenarios, the collection and processing of UAV flight data. Finally, in order to solve the problems of data interaction and decision making among UAVs, a cooperative communication control module is designed, and the specific hardware principle and communication protocol for data interaction are given, and the UAV formation cooperative control system is completed through simulation and test. It provides some theoretical support for unmanned combat in modern war and has practical reference significance.

Keywords Multi-UAV formation coordination, Multi-agent, Joint communication domain, Air-Sky-Low-Altitude-Land, Cooperative communication control module

基金项目:国家重点研发计划(2018YFB1800801);国家自然科学基金(61631020,61827801,61931011)

This work was supported by the National Key Research and Development Project of China(2018YFB1800801) and National Natural Science Foundation of China(61631020,61827801,61931011).

通信作者:甘良棋(liangqi-gan@nuaa.edu.cn)

1 引言

科学技术是军事发展中最活跃、最具革命性的因素，每一次重大科技进步和创新都会引起战争形态和作战方式的深刻变革。无人装备在战场上可以灵活配置，在陆、海、空、天等各空间都发挥着重要的作用，这也是技术变革下战争形式变革的必然趋势^[1]。人工智能集群中，各作战平台能够根据不同的作战目的和任务需求，以作战目标为中心，通过互联互通操作，信息及时交互，来实现作战部署^[2]。同时，在民用方面的应用越来越受到大家的关注，如抢险侦察^[3-6]、应急通信^[7-8]、交通指挥、智慧农业^[9-10]等。单架无人机能完成的任务非常有限且效率低，于是就需要考虑多无人机编队协同，无人机编队可以快速有效地完成任务。无人机编队飞行控制涉及空气动力学、自组网通信、协同信息感知^[11]、协同数据融合、协同航迹规划、协同任务分配等多学科交叉融合工程，过程中约束条件多、控制参数众多和复杂、多参数耦合，需要编队协同系统仿真与实物实验结合起来分析研究，才能逐步推进解决无人机协同编队飞行等系列问题。分布式控制器可以实现与邻居无人机进行飞行状态信息交互，但是单架次无人机单独感知外界环境信息的能力差^[12]。简单理解就是，现无人机集群编队飞行实验，都是基于单机的自主控制完成。为解决此问题，首先需要考虑空气动力学、自组网通信、协同信息感知、协同数据融合等；其次分析研究了四旋翼无人机的空气动力学，基于数学模型设计四旋翼无人机飞控；最后设计出无人机编队协同任务规划仿真系统，实现编队飞行保持和编队飞行重构^[13]，为后期研究编队协同任务规划提供参考。

2 应用场景

2.1 “空-天-低空-陆地”联合通信的域

多智能体系统^[14-15]由无人机编队、卫星宽带通信、导弹、自动驾驶车辆和航空器等具有自主或半自主控制的装备组成。每个智能体都能独立感知环境、规划任务并与周围其他智能体进行通信和协作。其中无人机编队协同应用研究就是多智能体协同控制场景中的一部分，如图 1 所示。多智能体协同可以实现陆地城市通信、城镇通信及其他通信等组成的域；低空飞行区域的无人机编队、飞艇及热气球等组成的域；民航、军事飞行区域的飞机、导弹等组成的域；太空飞行区域的卫星编队等组成的域，整个系统组成一个特定的“空-天-低空-陆地”联合通信的域。这些域应用在战争中，可以更加广域地实现通信“一张网”的场景。多智能体组网场景如图 2 所示。

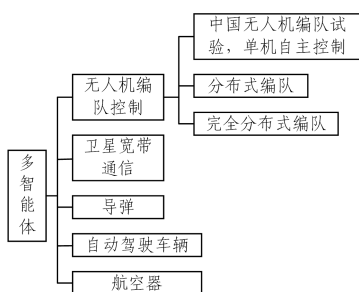


图 1 多智能体构成

Fig. 1 Multi-agent composition

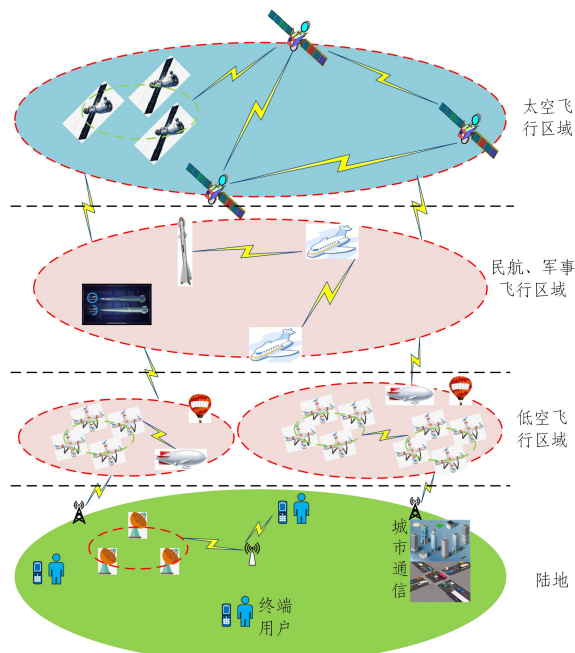


图 2 “空-天-低空-陆地”联合通信的域

Fig. 2 Domain for joint “Air-Sky-Low-Altitude-Land” communications

建立“空-天-低空-陆地”联合通信的域，在民用和军用方面都具有重要的作用。联合通信的域可以实现不同空间层次之间的信息传输和协同作战，为各个领域提供更高效、更可靠的通信服务。

在民用方面，建立“空-天-低空-陆地”联合通信的域，可以促进信息的快速传递和共享。例如，在交通运输领域，通过联合通信可以实现地面、飞机、卫星设备之间的实时数据传输，提高交通管理的效率和安全性。在应急救援领域，联合通信可以实现空中、地面、水下等多个不同空间层次之间的紧急信息传递，提高救援行动的响应速度和准确性。此外，联合通信还可以在农业、环境监测、能源等领域发挥重要作用，提高生产效率和资源利用效率。

在军用方面，建立“空-天-低空-陆地”联合通信的域，可以实现多个作战空间的协同作战和信息共享。通过联合通信，军队可以在空中、地面、海洋等多个空间层次之间实现实时的指挥、控制和情报交流，提高作战效能和战场态势感知能力。此外，联合通信还可以支持军事侦察、导航定位、通信保障等关键军事任务，提升军队的战略战术能力。

总之，“空-天-低空-陆地”联合通信的域，在民用和军用方面都具有重要的作用。它可以促进不同空间层次之间的信息传输和协同作战，提高效率、安全性和战斗力。

2.2 无人机编队协同动态组网

无人机编队飞行，简称 CFF (Coordinated Formation Flight)，编队中的单架无人机通过感知周围局部的动态信息，来确定自身的飞行轨迹，同时无人机编队飞行能够保持队形稳定，且可以实现编队队形变换和编队队形重构。编队控制主要有集中式控制法、分散式控制法、分布式控制法和 Leader-follower 法^[16]。编队飞行的 3 个指标为：中心聚集、避免碰撞和整体迁移^[17]。在编队飞行的过程中，要实现每个个体防止碰撞，使自身的速度与局部周围无人机的速度保持一致，且试图向周围的无人机靠拢^[17]。当编队队形发生变换时，避

障控制是必须要考虑的问题^[18]。我国地广人多,各区域之间地理环境差异较大,人口分布广泛,基础设施建设存在差异化。基于无人机编队协同的动态组网具有深远意义,无人机编队可以快速达到灾区,并在受灾最严重的地区组成高效率的动态网络系统,可以通过无人机作为移动节点,建立一个临时、灵活的通信网络,弥补地面基站信号覆盖不足的问题。同时新建的基站可以提供稳定、高效的通信信号,确保救援行动及时有效。2023年8月3日,河北涿州洪灾,启用无人机应急通信系统助力通信严重阻断区域的网络通信,单架次无人机中继通信可实现30km²的有效信号覆盖^[19],为灾区救援赢得了黄金时间。当偏远地区突发自然灾害时,对外界的通信中断,需要紧急救援,时间就是生命;当城市交通日益繁华,上下班高峰期和节假日时,道路堵车日趋加重,严重影响了快节奏工作和生活的人们。提出无人机编队协同救灾动态组网系统,救灾动态组网 UAV1 无人机感知受灾严重区域,及时建立动态通信基站,联合救灾动态组网 UAV2 等,扩大通信覆盖区域;上下班高峰期和节假日出行人数在特定区域激增,遇到交通信号调配不及时,导致发生严重堵塞,提出无人机编队协同交通动态组网调配系统,交通动态组网 UAV3 无人机感知道路车辆拥堵,联合交通动态组网 UAV4 等及时与动态车辆和交通信号控制端进行信息交互,指示车辆避开拥堵,协助交通信号控制端采集实时数据以及及时更新优化控制信号,为解决道路堵塞提供必要的现场信息。无人机编队协同通信动态组网系统的拓扑结构如图3所示。

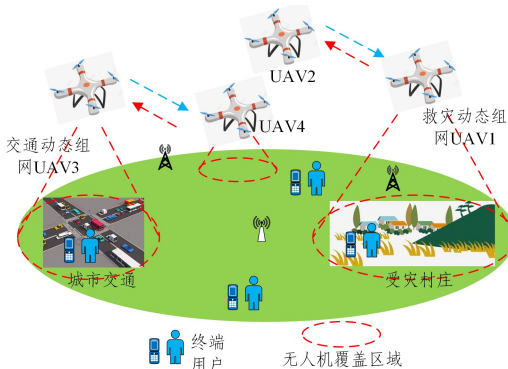


图3 无人机编队协同动态组网

Fig.3 UAV formation collaborative dynamic networking

3 无人机编队系统控制器设计

3.1 单架无人机控制器

四旋翼无人机是一种欠驱动系统,4个螺旋桨呈“X”分布^[10]。机体坐标系与惯性坐标系转换如式(1)所示。机体受力和建立坐标系如图4所示。

$$R_b^c = R_{(z,\psi)} R_{(y,\theta)} R_{(x,\varphi)} \quad (1)$$

其中, R_b^c 为机体坐标系到惯性系之间的转换矩阵, $R_{(z,\psi)}$ 表示绕Z轴转 ψ 度, $R_{(y,\theta)}$ 表示绕Y轴转 θ 度, $R_{(x,\varphi)}$ 表示绕X轴转 φ 度。螺旋桨拉力与力矩如式(2)所示。

$$\begin{cases} \rho = \frac{273P_a}{101325(273+T_i)}\rho_0 \\ P_a = 101325(1 - 0.0065 \frac{h}{273+T_i}) \\ \rho_0 = 1.293 \frac{Kg}{m^3} \end{cases} \quad (2)$$

其中, ρ 表示为空气密度, T_i 表示摄氏温度, h 表示海拔高度。

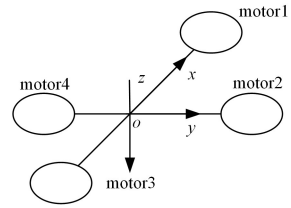


图4 无人机受力

Fig.4 UAV is forced

四旋翼无人机受到的外力包括重力、螺旋桨拉力、飞行阻力及机体系力矩等。在机体坐标系中,四旋翼无人机所受总力矩如式(3)所示:

$$\begin{aligned} M_b &= M_b^c + M_{bg} \\ &= \begin{bmatrix} lc_T(\Omega_2^2 - \Omega_4^2) + J_z q(-\Omega_1 + \Omega_2 - \Omega_3 + \Omega_4) \\ lc_T(\Omega_3^2 - \Omega_1^2) + J_z p(-\Omega_1 + \Omega_2 - \Omega_3 + \Omega_4) \\ c_M(-\Omega_1 + \Omega_2 - \Omega_3 + \Omega_4) \end{bmatrix} \quad (3) \end{aligned}$$

考虑四旋翼无人机在飞行时受空气阻力、陀螺效应力矩及螺旋桨升力等,4旋翼无人机构学模式模型如式(4)所示。可以解耦出4个控制输入,如式(5)所示。由以上分析可以得出控制链,如式(6)所示。

$$\begin{cases} U_1 = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 \\ U_2 = l(F_2 - F_4) \\ U_3 = l(F_3 - F_1) \\ U_4 = -M_1 + M_2 - M_3 + M_4 \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} U_2 = (F_2 - F_4)l \rightarrow p \rightarrow \varphi \rightarrow v \rightarrow Y \\ U_3 = (F_3 - F_1)l \rightarrow q \rightarrow \theta \rightarrow u \rightarrow X \\ U_1 = \sum_{i=1}^4 -T_i \rightarrow w \rightarrow z \\ U_4 = M_2 + M_4 - M_1 - M_3 \rightarrow r \rightarrow \psi \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \dot{x} = u \\ \dot{y} = v \\ \dot{z} = w \\ \dot{u} = \frac{F_x}{m} = \frac{K_{f_x}u - c_T \sum_{i=1}^4 \Omega_i^2 (\cos \psi \sin \theta \cos \varphi + \sin \psi \sin \varphi)}{m} \\ \dot{v} = \frac{F_y}{m} = \frac{K_{f_y}v - c_T \sum_{i=1}^4 \Omega_i^2 (\sin \psi \sin \theta \cos \varphi - \cos \psi \sin \varphi)}{m} \\ \dot{w} = \frac{F_z}{m} = \frac{K_{f_z}w - c_T \sum_{i=1}^4 \Omega_i^2 (\cos \theta \cos \varphi) + mg}{m} \\ \dot{\varphi} = p + p \sin \varphi \tan \theta + r \cos \varphi \tan \theta \\ \dot{\theta} = q \cos \varphi - r \sin \varphi \\ \dot{\psi} = q \sin \varphi \sec \theta + r \cos \varphi \sec \theta \\ \dot{p} = \frac{M_\varphi}{J_x} = \frac{lc_T(\Omega_2^2 - \Omega_4^2) + J_z q(-\Omega_1 + \Omega_2 - \Omega_3 + \Omega_4)}{J_x} \\ \dot{q} = \frac{M_\theta}{J_y} = \frac{lc_T(\Omega_3^2 - \Omega_1^2) + J_z p(-\Omega_1 + \Omega_2 - \Omega_3 + \Omega_4)}{J_y} \\ \dot{r} = \frac{M_\psi}{J_z} = \frac{c_M(-\Omega_1^2 + \Omega_2^2 - \Omega_3^2 + \Omega_4^2)}{J_z} \end{cases} \quad (6)$$

基于以上研究分析,为验证设计的控制器可靠性,设计的无人机姿态解算和姿态控制原理如5图所示。

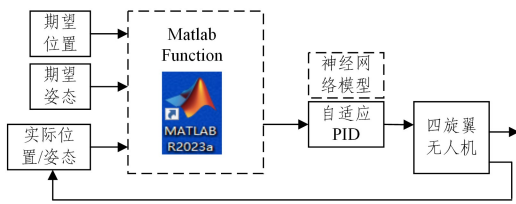


图 5 无人机控制系统框图

Fig. 5 Block diagram of UAV control system

本文设计了自适应 PID 控制器和神经网络控制,在 MATLAB R2023a/Simulink 模块中搭建仿真模型,根据验证俯仰角、翻滚角和偏航角响应时间分别缩短了 0.35 s, 1 s, 0.68 s。

3.2 协同编队系统控制设计

四旋翼无人机在空中飞行有 6 个自由度,但是只有 4 个输入是典型的强耦合欠驱动系统^[10],通过设计无人机的反馈控制系统飞控,能够实现稳定飞行,如图 6 所示。

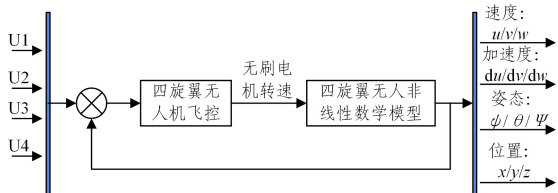


图 6 无人机反馈控制系统

Fig. 6 UAV feedback control system

根据已经完成的单个无人机仿真控制器,实验数据表明所设计的控制器能够满足精确飞行要求。针对编队协同控制,采用多系统分布式的实验仿真进行验证。首先完成单个无人机的数据仿真,包括运行参数、路径规划和信息交互等,

主要考虑响应时间、控制精度和网络时延等参数;完成地面站控制中心仿真,包括数据转发、数据回传、运行状态可视化和编队队形可视化交互等;完成任务场景仿真,包括场景仿真、各无人机数据交互仿真等。无人机协同编队控制系统的原理如图 7 所示。

单无人机控制模块由通信模块、四旋翼无人机飞控模块、协同通信控制模块等组成,能够实现对单无人机的飞行姿态、路径规划和协同信息感知收集等进行配置。每架无人机都有一个通信模块,主要功能是完成各个无人机之间信息感知、数据融合、航迹规划、任务分配等任务,实现根据实时编队环境进行独立决策、独立行动。单个无人机相当于一个快速移动的网络节点,通信模块支持 Ad hoc 协议,使得协同编队中无人机可以实现移动中快速自组网和“动中通”的效果。同时通信模块可以实时与周边无人机进行飞行数据和环境感知数据共享,并将感知的数据经过处理后与飞控进行融合解耦,完成实时飞行姿态、位置的决策与行动。协同通信控制模块包含自组网通信、协同信息感知、协同数据融合、协同航迹规划和协同任务分配等功能,且能够与单个无人机中的通信模块、多无人机编队协同仿真平台的数据收集和处理模块、地面站控制中心的协同通信控制数据处理模块等通信模块进行信息数据实时交互,达到各个通信模块之间实时完成数据的处理与交换,实现单个无人机可以及时快速地决策姿态和位置,保证编队协同控制飞行顺利完成。协同通信控制模块 I 收集各个无人机的通信模块感知的上传数据,通过深度学习和神经网络算法进行统一运算处理,得出最优实时状态的最优路径和飞行姿态指令,再将其返还至每个无人机的通信模块,通信模块与飞控完成数据融合后,将控制无人机的飞行姿态与位置更新,实现编队协同飞行。

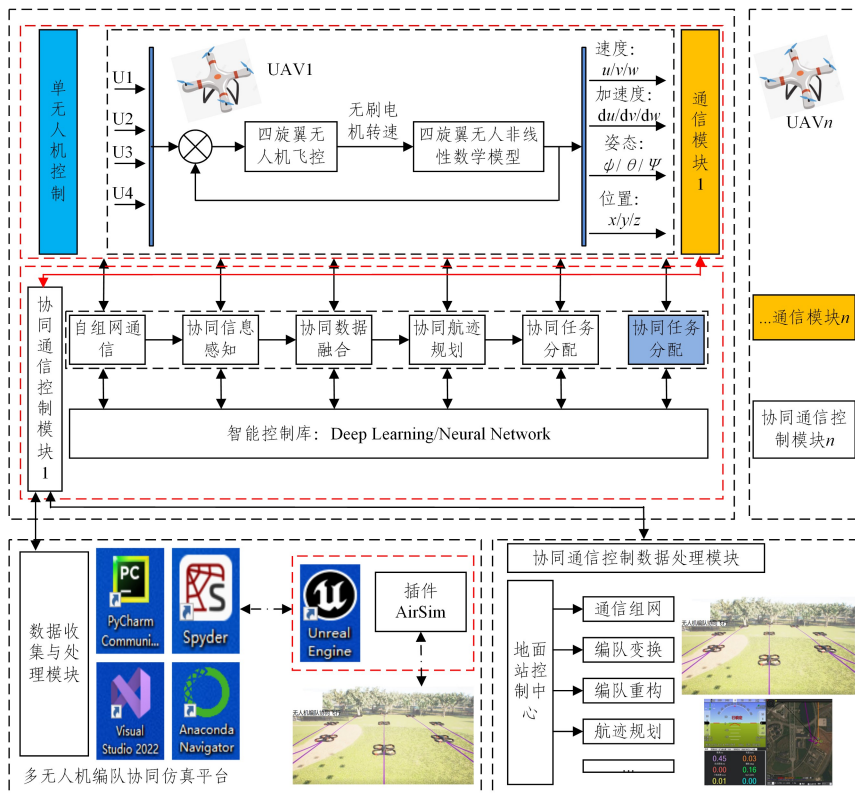


图 7 无人机编队协同控制系统

Fig. 7 UAV formation collaborative control system

4 无人机编队协同仿真系统实现

协同通信控制模块作为通信模块、数据收集与处理模块、协同通信控制数据处理模块等各模块间的通信桥梁,在编队协同控制中起到关键作用。它们之间的逻辑关系如图 8 所示。

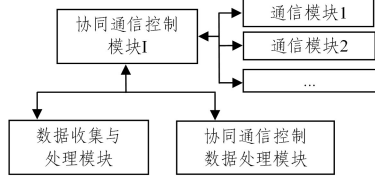


图 8 无人机编队协同仿真系统模块关系

Fig. 8 Relationship between UAV cooperative formation control system modules

单个无人机之间、无人机编队与地面站控制中心、多无人机编队协同仿真平台之间通过无线通信协议进行数据和指令的传输与发送,作战指挥员可以实现最高权限接管编队,且可以进行远距离实时跟踪编队飞行状态。QGroundControl 地面站可以实时读取无人机编队位置、速度和姿态等信息,同时能够发送起飞、返航和姿态变换等指令,如图 9 所示。为此,设计各个模块间自定义传输协议,主要包括信息发送与信息回复两个方向,自定义传输协议的消息结构如表 1、表 2 所列。

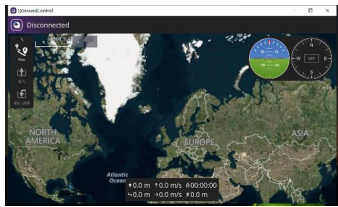


图 9 无人机编队地面站

Fig. 9 UAV formation ground station

表 1 消息发出结构

Table 1 Structure of message sending

序号	长度	内容	说明
1	1(0)	消息头	0×2f
2	1(1)	命令码	0×03
3	1(2)	操作码	0×05
4	1(3)	信息长度	35
5	1(4)	请求指令	是否允许建立通信
6	1(5)	无人机地址	本端 IP 地址
7	1(6)	消息类型	队形变化命令、任务分配命令、航迹规划命令等
8	1(3)	下一跳	邻近无人机 IP 地址
9	1(3)	校验码	核对

表 2 消息回复结构

Table 2 Structure of message reply

序号	长度	内容	说明
1	1(0)	消息头	0×2f
2	1(1)	命令码	0×01
3	1(2)	操作码	0×04
4	1(3)	信息长度	2
5	1(4)	应答标志	建立通信
6	1(3)	无人机地址	无人机 IP 地址
7	1(3)	消息类型	队形变化命令、任务分配命令、航迹规划命令等
8	1(3)	校验码	核对

编队中每个无人机的通信模块按照设定的报文协议进行数据传输。按照通信协议,首先发出端无人机发送“请求

指令”,邻近无人机收到信息后做出同意接收指令;其次,当建立好通信通道后,本端的无人机与邻近无人机进行“无人机地址”“消息类型”及“下一跳”地址等的自主交互。当以上数据交互和解析完成后,将整理的数据交由协同通信控制模块 I 进行智能处理、智能控制库的运算,对无人机编队的航迹规划和编队任务进行控制。

协同通信控制模块如图 10 所示。考虑到需要进行数据交换,采用 PSoC 芯片,一个单片可以实现最小系统和 FPGA 功能,完成数据交换任务,具有功耗小、体积小和低成本等优点。同时,硬件型号基本选用国产型号,包含 DDR3 和 NOR FLASH 的组合,内存更大;PHY 芯片进行本机之间的数据交互使用;无线发射/接收模块进行无线数据的交换。

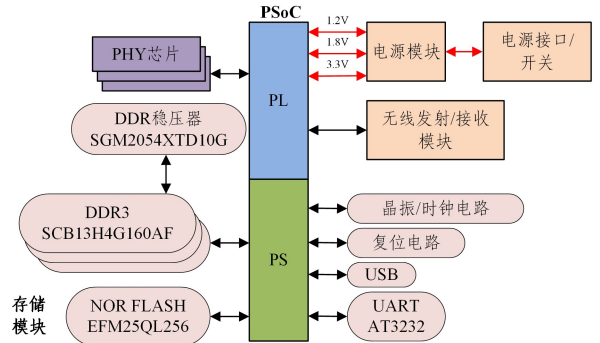


图 10 协同通信控制模块硬件实现

Fig. 10 Hardware implementation of collaborative communication control module

数据收集与处理模块如图 11 所示。

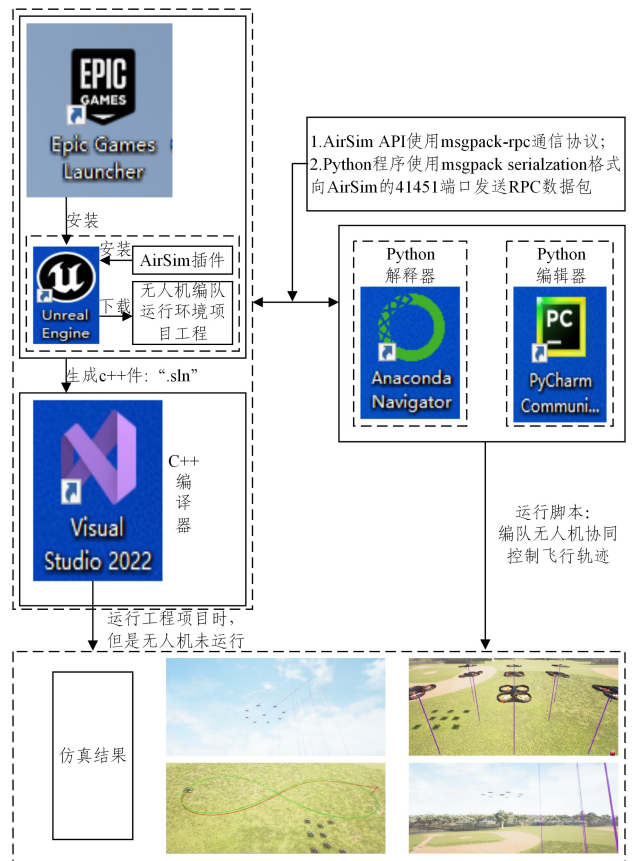


图 11 数据收集与处理模块无人机编队仿真实现

Fig. 11 Data collection and processing module is simulated for UAV formation

无人机编队飞行仿真需要完成 3D 仿真环境、3D 无人机模型、航迹规划等关键点。使用 AirSim 插件编辑无人机编队仿真的运行环境,生成“.sln”文件,之后在 Visual Studio2022 打开以上工程;在 PyCharm 中编写编队无人机协同控制的程序代码。AirSim 插件实现模拟无人机编队的飞行环境,无人机编队飞行控制是通过 Python 实现,两者之间使用 msg-pack-rpc 网络通信协议进行跨语言通信。

协同通信控制数据处理模块的界面如图 12 所示。通过 QGroundControl 地面站设置起飞点、返航点、航点、规划航线等。同时设计了协同通信控制数据处理模块的 GUI,通过设计的界面可以实时查看每架无人机的飞行参数,如高度、航点距离、升降速度、地速、偏航和姿态等。对于单架无人机还可以查看动作、起飞自检、仪表数据、状态数据和航向等参数。

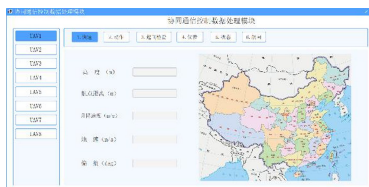


图 12 协同通信控制数据处理模块

Fig. 12 Data processing module for cooperative communication control

5 仿真结果

验证 1 在 Matlab R2023a/Simulink 搭建仿真环境,依据以上分析设计的 PID 控制器得出翻滚角、俯仰角和偏航角响应时间分别为 0.5 s,0.3 s 和 2.5 s,如图 13 所示。

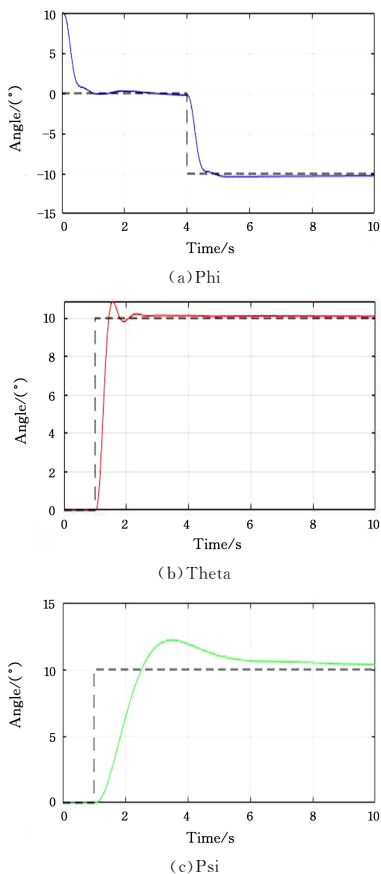


图 13 翻滚角、俯仰角及偏航角控制

Fig. 13 Roll, pitch and yaw

验证 2 为验证算法的可实现性,设计绕曲线跟踪实验。首先从起飞点上升至 4 m 高度,然后悬停 5 s 后,根据规划的曲线路径无人机以 5 m/s 的速度完成飞行,如图 14 所示。

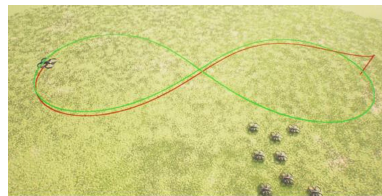


图 14 曲线路径跟踪仿真

Fig. 14 Curve path following simulation

根据实验结果可以得出,路径跟踪精度达到 0.08 s。

验证 3 为验证编队协同控制飞行的可行性,设计 9 架次 UAV 初始坐标分别为(0,0),(2,0),(4,0),(-4,0),(2,-3),(4,-4),(0,4),(2,3),(4,4),原地组成 3 条直线编队后,按照指令起飞,飞行一半路程后航迹变换成 5 条直线,两边各 1 架 UAV 共两条直线,中间 3 架 UAV 共一条直线,剩下 4 架 UAV 分两条直线,如图 15—图 18 所示。起飞高度 9 m,最大飞行速度 6 m/s,距离邻居 UAV 最大半径 25 m。

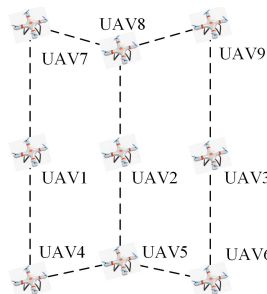


图 15 无人机编队队形-1

Fig. 15 UAV formations -1



图 16 编队飞行-1

Fig. 16 Formation flight-1



图 17 编队飞行-2

Fig. 17 Formation flight-2

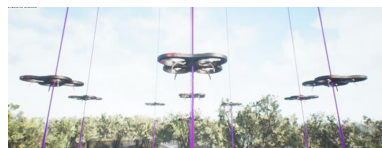


图 18 编队飞行降落

Fig. 18 Flying and landing in formation

结束语 多智能体协同控制是当今战场的重要技术。其关键点就是通信组网要快速、决策和部署要精确等。本文提出了“空-天-低空-陆地”联合通信的域,具体设计了无人机编

队协同控制系统,并且验证了所设计的控制系统的可行性。为现代战争的无人化协同部署提供一定的理论依据。

参 考 文 献

- [1] 军工行业专题报告之无人装备深度研究[EB/OL]. 2020-10-18 [2024-01-09]. <https://finance.sina.com.cn/stock/stockzmt/2020-10-18/doc-iiznezxr66884066.shtml>
- [2] 中国军网. 无人智能作战有哪些优势[EB/OL]. 2023-01-12 [2024-01-09]. http://www.81.cn/jfjbmmap/content/2023-01-12/content_331710.htm
- [3] 杨飞. 无人机在高原森林灭火中的应用[J]. 今日消防, 2023, 8(6):20-23.
- [4] GUPTAL, JAINR, VASZKUNG. Survey of Important Issues in UAV Communication Networks[J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2016, 18(2):1123-1152.
- [5] KINGSTOND, BEARDR, HOLTR. Decentralized Perimeter Surveillance Using a Team of UAVs[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2008, 24(6):1394-1404.
- [6] KAI L, VOICURC, KANHERE SS, et al. Energy efficient legitimate wireless surveillance of UAV communications[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(3):2283-2293.
- [7] WU Q Q, ZENG Y, ZHANG R. Joint Trajectory and Communication Design for Multi-UAV Enabled Wireless Networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 17(3):2109-2121.
- [8] CHEN J X, XU Y H, WU Q H, et al. Interference-aware Online Distributed Channel Selection for Multicluster FANET: a Potential Game Approach[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(4):3792-3804.
- [9] ALENAO, NIELSA, JAMESC, et al. Optimization approaches for civil applications of unmanned aerial vehicles (UAVs) or aerial drones: A survey[J]. Networks, 2018, 72(4):411-458.
- [10] GAN L Q. Research on Design and Control Method of Unmanned Aerial Vehicle with Manipulator[D]. Guilin: Guilin University of Electronic Technology, 2020.
- [11] ZONG Q, WANG D D, SHAO S K, 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.
- [12] WANG D D. Research on Distributed Formation Keeping and Reconfiguration Control for Multiple Unmanned Aerial Vehicles[D]. Tianjin: Tianjin University, 2019.
- [13] REN G S, CHANG J, CHEN W S. Present and Prospect of Intelligent Autonomous Control for UAV[J]. Control and Information Technology, 2018, 456(6):13-19.
- [14] MENG L H, XU X H, ZHAO Y F. Cooperative coalition for formation flight scheduling based on incomplete information[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2015, 28(6):1747-1757.
- [15] LIU Z, GAO X G, FU X W. Coalition Formation for Multiple UAVs Cooperative Search and Attack with Communication Constraints in Unknown Environment[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017(6):688-699.
- [16] LI W, CHEN J. Review and Prospect of Cooperative Combat of Manned/Unmanned Aerial Vehicle Hybrid Formation[J]. Aerospace Control, 2017, 35(3):90-96.
- [17] REYNOLDS C W. Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model[J]. ACM SIGGRAPH Computer Graphics, 1987, 21(4):25.
- [18] QIU H X, DUAN H B. From collective flight in bird flocks to unmanned aerial vehicle autonomous swarm formation[J]. Chinese Journal of Engineering, 2017, 39(3):317-322.
- [19] 河北新闻网. 河北涿州: 无人机架起“空中基站”[EB/OL]. 2023 [2024-01-09]. https://hebei.hebnews.cn/2023-08/04/content_9050000.htm.



GAN Liangqi, born in 1992, Ph.D post-graduate. His main research interests include intelligent network of UAV network and “mosaic warfare”.



DONG Chao, born in 1980, Ph.D supervisor, is a member of China Computer Federation. His main research interests include intelligent networking and communication of UAV, aviation 6G network, IoT and aerospace bionic science and technology.