doi:10.14132/j.cnki.1673-5439.2023.01.006

基于 OSDK 的分布式无人机集群控制系统设计与验证

董广胜[1],李大鹏[1],田 峰[1],丁良辉[2],杨锦彬[1]

(1.南京邮电大学 通信与信息工程学院,江苏 南京 210003
2.上海交通大学 电子工程系,上海 200240)

摘要:针对当下无人机集群平台可靠性低、实用性差的问题,提出基于 Onboard SDK 的分布式无人机集群控制系统(Distributed UAV Swarm Control System, DUSS)设计方案。首先,基于模块化思想,将 DUSS 分为控制模块、执行模块与监控模块,控制模块与监控模块利用自组网通信方式与 ROS 分布式通信机制,实现对异构集群的分布式控制,OSDK 的使用在降低模块间耦合度的同时实现控制模块与执行模块的交互,其对底层控制逻辑的封装可减少时间成本;其次,在考虑真实物理环境中的惯性因素的基础上对人工势场法进行改进,设计一种一致性联合虚拟势场(CVPF)编队算法,解决目标不可达问题并使用 DUSS 进行演示;最后,通过试验证明 DUSS 在保证避碰的前提下可实现编队飞行、队形保持以及队形变换等功能,验证了 DUSS 作为分布式无人机集群平台的可行性与 CVPF 算法的稳定性。

关键词:无人机集群编队;OSDK;分布式控制;速度一致性;位置一致性
中图分类号:TN929.52 **文献标志码**:A **文章编号**:1673-5439(2023)01-0044-008

A design scheme of the distributed UAV swarm control system based on OSDK

DONG Guangsheng[1], LI Dapeng[1], TIAN Feng[1], DING Lianghui[2], YANG Jinbin[1]

(1.Shool of Communications and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China
2.School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Given the low reliability and poor practicability of unmanned aerial vehicle (UAV) cluster platforms, a design scheme of the distributed UAV swarm control system (DUSS) is proposed based on the onboard software development kit (SDK). First, DUSS is divided into the control module, the implementation module and the monitoring module. The control module and the monitoring module control the heterogeneous clusters in a distributed way by the Ad Hoc network communication mode and the robot operating system (ROS) distributed communication mechanism. OSDK can reduce the coupling degree between modules, and enable the interaction between the control module and the execution module. Thus, the time cost is reduced through encapsulation of the underlying control logic. Second, the artificial potential field method is improved based on the inertial factors in the real physical environment, and a consistent virtual potential field (CVPF) formation algorithm is designed to tackle the inaccessibility of targets and DUSS is deployed to display it. Finally, the experiment demonstrates that DUSS can ensure formation flying, formation keeping, formation transformation and other functions while ensuring collision

收稿日期:2022-06-06;**修回日期**:2022-08-25 **本刊网址**:http://nyzr.njupt.edu.cn
基金项目:国家自然科学基金(61801240)资助项目
作者简介:董广胜,男,硕士研究生;李大鹏(通信作者),男,博士,教授,dapengli@njupt.edu.cn
引用本文:董广胜,李大鹏,田峰,等.基于 OSDK 的分布式无人机集群控制系统设计与验证[J].南京邮电大学学报(自然科学版),2023,43(1):44-51.

avoidance. It verifies the feasibility of DUSS as a distributed UAV cluster platform and the stability of the CVPF algorithm.

Keywords: UAV swarm formation; OSDK; distributed control; speed consistency; position consistency

无人机作为一种高机动无人飞行器,其小型、低成本、易携带和易投射[1]的特点使其在现代战争、民生经济中得到广泛应用[2],集群化的无人机可以更加高效精确地完成对敌作战、物流配送和救灾支援等任务。无人机集群编队理论已经发展多年并取得诸多成果,而基于实物的分布式无人机集群系统是集群理论得到广泛应用的前提。国内外已有部分针对无人机集群仿真平台或实物集群平台的研究,目前无人机集群平台主要分为两类:软件仿真平台以及实物仿真平台。

常见的无人机仿真软件包括 Gazebo、AirSim 等,其通过运行自定义程序实现多无人机仿真。Gazebo 基于内置物理引擎能够提供高保真度的物理模拟,在国内外众多群体智能方案落地前,大多用机器人操作系统(ROS)及 Gazebo 进行软件仿真验证,但 Gazebo 多机仿真架次上限为 10 架[3];而以 Gazebo 作为仿真环境,PX4 等开源飞控搭配组网链作为硬件而搭建的半实物仿真平台,可以实现进一步模拟非理想通信条件下的真实环境。

常见无人机编队仿真平台(包含仿真平台与实物平台)可以分为 4 类[4]:单系统仿真平台、基于 HLA 架构的分布式系统仿真平台、自主开发的多飞行器编队分布式虚拟系统仿真平台以及自主开发的多无人机编队分布式实物系统仿真平台,其中实物平台具备完善的飞控设备、组网方式以及地面站系统,可以直接为理论研究服务。文献[5]运用 X-Plane 飞行模拟软件与 Matlab 开发出了多无人机仿真平台,其研究工作具有开创性作用,但仿真平台可移植性较差;文献[6-7]提到的基于 C++开发的 Multi-UAV2 仿真系统,可将其用于协同控制研究;文献[8]利用分层思想,将无人机控制系统分为决策层与执行层,采用 PIX 自驾仪进行封装开发的集群演示系统可以验证不同集群控制算法,其双地面站设计增强了系统安全性,但也增大了系统复杂度;文献[9]中提到的由多功能计算机与 PC104 控制器组成的仿真平台,可以实现对多无人机编队实时仿真、算法验证以及通信组网;文献[10]基于 JMAVSim 软件,结合遥控器与 PixHawk 飞控,在仿真计算机中实现了单机航迹半实物仿真,该半实物仿真平台实现简单,但无法应用到多无人机仿真;文献[11]基于 Multi-Agent 技术并采用分层体系结构开发出了 UAVSim 仿真平台,可以以较低成本实现多无人机仿真;文献[12]提及的运用 Unity 开发视景软件,配合多种人机交互设备实现人对仿真演示的干预,其可用于无人机仿真场合。

而随着功能需求的不断变化,无人机集群系统将向异构多无人机协同编队、多种载荷数据融合方向发展。同时,分布式集群将成为未来无人化装备的主流,不同于集中式设计,分布式系统中不设置主节点,可以避免主节点被击毁造成的集群崩溃,提高集群的抗毁伤性;同时,邻节点之间相互通信可以增加系统灵活性。

当前集群编队控制算法大多停留在理论或仿真阶段,诸多算法实用性有待考证,为此搭建了基于 OSDK 的分布式无人机集群控制系统,不同于之前研究,使用 OSDK 可以实现快速开发无人机控制程序,同时,基于 OSDK 开发的程序可以直接作用于 A3、N3 等飞控,较好地解决了以往集群平台扩展性差的问题。基于模块化思想,验证系统被分为监控模块、控制模块和执行模块,监控模块为地面控制站(GCS),其利用 ROS 话题订阅机制,可以实时订阅所有飞机状态、发布飞行指令并获取飞机载荷回传信息,控制模块运行集群控制算法,订阅 GCS 指令信息,并通过 OSDK 发送底层指令至执行模块,后者解算控制指令,生成速度或位置信息控制无人机实现航迹规划等任务。通过修改控制模块承载的集群控制算法,可以实现对不同算法的性能验证并进行针对性优化。

多无人机控制算法主要包括:路径规划算法、编队飞行与避障避撞算法以及队形变换、重构和目标检测搜索算法[13],其中,编队算法常采用经典的 Leader-Follower 法、人工势场法。人工势场法因为原理简洁易懂、实现简单而研究者众多,但其存在 3 个突出的问题:其一是目标与障碍物距离过近导致目标不可达;其二是引力与斥力大小相等,方向相反,易陷入局部极小点;其三是航迹狭窄区域,周围障碍物均施加斥力,无人机可能陷入振荡。基于分布式系统一致性要求,结合虚拟势场设计集群控制算法,利用人工势场法易于理解的优点并对其加以改进,并在此基础上考虑真实环境中惯性因素(负

载越多,惯性越大)后设计了 CVPF 算法,最后嵌入 DUSS 以实现多无人机编队与队形保持、变换功能,同时可灵活修改参数进行优化。

1 DUSS 设计与搭建

1.1 DUSS 总体架构

DUSS 作为自主设计的集群控制系统方案,其采用了分布式的集群控制方案,相较于传统的集中式控制方案,分布式结构可拓展性强[14],可以灵活控制飞机数量,其不设置主节点的特点可以提高系统的安全性,在部分节点损毁后,其他节点能够不受影响。同时,分布式结构有利于单体无人机控制程序的开发,能够提高代码复用性。分布式结构需要重点关注系统的一致性问题,由 ACID 理论可知,各节点有独立的运算和存储空间,而节点之间通过网络通信进行协作,多个节点只有在对某一变量达成一致时,本次的取值才能被确定。在集群执行飞行任务时,节点之间进行双向通信,图 1 展示了多无人机的分布式结构,每架无人机的有效通信范围为 R,则无人机 i 的邻居集合为

$$\mathrm{Nei}_i = \{j: \| p_i - p_j \| < R, j \neq i\} \tag{1}$$

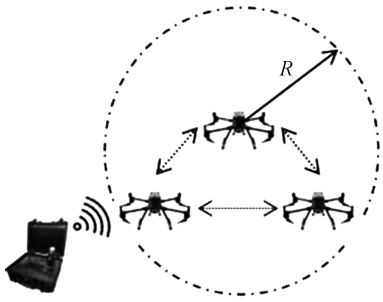


图 1 分布式通信拓扑结构

集群系统在常规环境下,是一个高阶、非线性[15]并具有通信延迟、干扰的非理想系统,集群系统需保持一致性稳定,需定义队形保持的位置和速度协同变量,同时分布式系统需要满足信息一致性要求。

搭载机载计算机的飞行平台可看作单一节点,运用 ROS 分布式通信机制与 OSDK 开发模式实现地面站与节点以及节点之间互联互通,基于模块化思想的 DUSS 总体架构如图 2 所示。

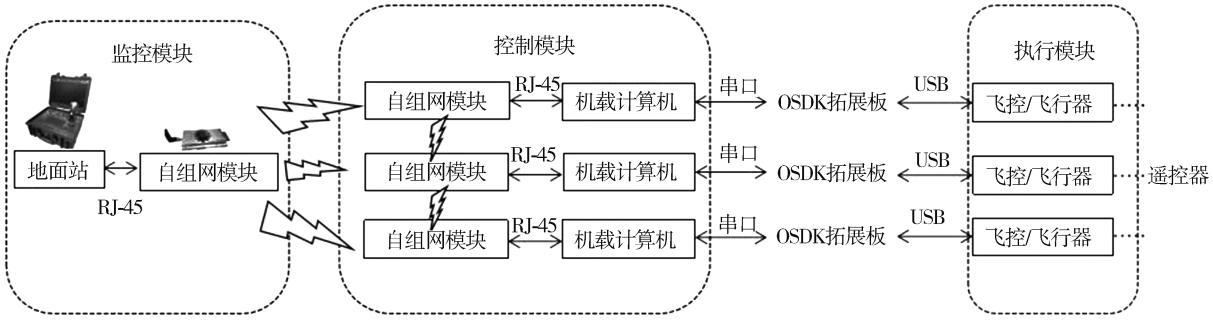


图 2 DUSS 架构图

1.2 DUSS 模块设计及其特点

1.2.1 地面控制站(GCS)

搭载了自行开发的地面站软件的 GCS 作为集群的外部控制器兼监控模块主体,利用 ROS 分布式通信机制将该机设置为 ROS Master 主节点,使用 RPC 帮助 ROS 节点相互查找、建立连接,同时提供参数服务器来管理全局参数;地面站可以实时监控集群内各无人机的飞行状态,在紧急情况下可以终止任务并迫使无人机降落。

1.2.2 机载计算机

选用 NVIDIA Jetson TX2 作为集群节点的运算中枢,其与 OSDK 串口通信波特率设置为 921 600 Baud。OSDK 全称为 Offboard SDK,基于 OSDK 开发的算法程序能够运行在机载计算机上,通过调用 OSDK 指定接口可以实时获取无人机状态与载荷信息,同时 OSDK 将与无人机飞控交互的底层代码封装,提高了代码的复用性并较大幅度降低了开发难度,在试验不同集群算法时,控制模块使用通用的位置、速度控制指令,即可实现对飞机的精确操控;相较于常见的 PX4 自驾仪软件[16],OSDK 易于理解并且提供了丰富的接口,可拓展性、兼容性更强。

1.2.3 自组网模块

自组网模块由 CETC 自主研发,数据链路频段为 1.4 GHz,工作带宽 20 MHz,通过修改地面站主机、机载计算机 IP 地址与 ROS_MASTER_URI,实现底层链路联通和地面站与集群、集群内部的分布式通信,为无人机间交换信息、地面站监控集群状态提供通信前提,自组网模块统一工作于 192.168.2.x 网

段。地面站作为 ROS Master 节点帮助节点间建立连接后,利用 ROS 分布式通信机制将地面站命令发布给各个 ROS 节点,集群中各节点订阅其邻节点状态信息与地面站命令信息。

1.2.4　飞行控制器

使用 A3 或 N3 飞控作为核心控制器而自主设计的无人机(或 DJI M300)作为执行模块的核心,与控制模块使用 OSDK 进行交互,在收到控制模块速度、位置指令后,对无人机运动行为及其负载进行控制,并回传状态信息(GPS、IMU 四元数与传感器信息)给控制模块,不同于传统的 Pixhawk 飞控与身为其前身的 APM 飞控,系统所采用的 A3/N3 飞控有更好的稳定性与可靠性,其双 IMU 冗余设计可保障数据安全。综上,DUSS 控制流程如图 3 所示。

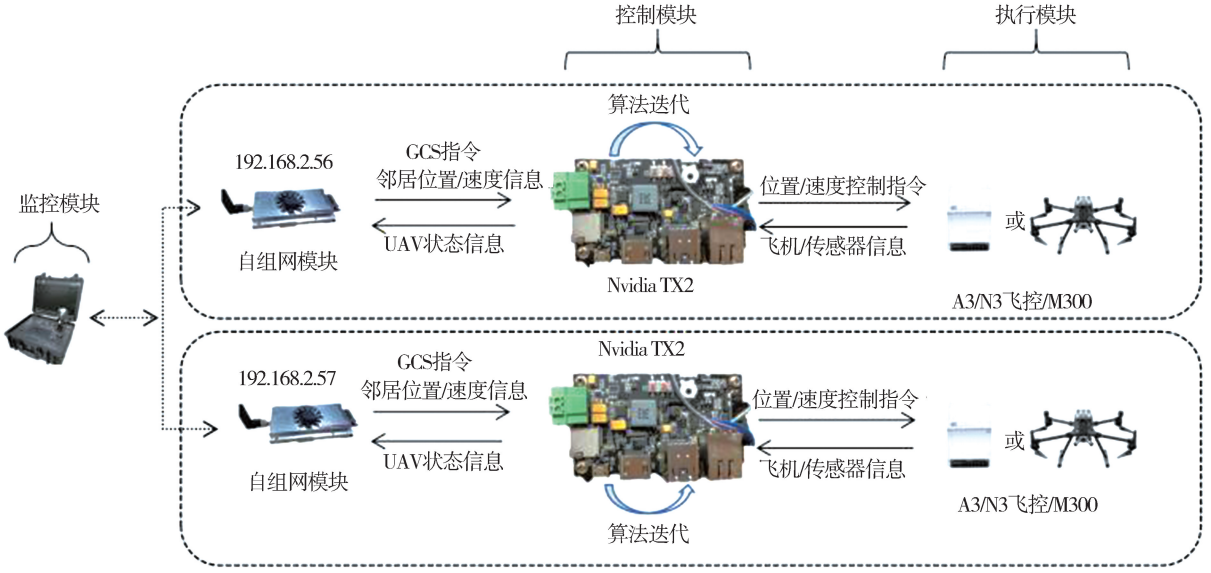


图 3　DUSS 控制流程图

2　CVPF 编队控制算法

本节设计了一种一致性联合虚拟势场编队防撞控制算法,在分布式系统一致性需求基础上,对人工势场法目标不可达的缺点[17]进行改进,并考虑削减真实环境中惯性因素引起的位移误差。为此,将无人机 i 建模为二维动力学模型

$$\begin{cases}\dot{p}_i = v_i \\ \dot{v}_i = u_i\end{cases} \tag{2}$$

式中:p_i、v_i、u_i 为无人机 i 的期望位置、速度与输入项。

第 i 架无人机的输入为

$$u_i = u_i^{\mathrm{c}} + u_i^{\mathrm{t}} \tag{3}$$

式中:u_i^{c} 为编队控制输入,u_i^{t} 为目标点移动输入。第一项编队控制输入,由邻居节点的势场函数输入与队形保持输入叠加构成,保证集群位置、速度的一致性与避撞。

编队控制输入 u_i^{c} 由势函数输入 u_i^{apf} 与队形保持输入 u_i^{f} 共同组成

$$u_i^{\mathrm{c}} = u_i^{\mathrm{apf}} + u_i^{\mathrm{f}} \tag{4}$$

无人机所受合力为

$$F = \sum_{j=1,j\neq i}^{N} f_j \tag{5}$$

式中:f_j 为无人机 i 所受无人机 j 施加的势场力,N 为无人机数量。

势场施加给无人机的引力/斥力为势函数的梯度,无人机 i 势函数输入为

$$u_i^{\mathrm{apf}} = -\sum_{j=1,j\neq i}^{N} \nabla_{pi} U_{ij} \tag{6}$$

虚拟势场函数 $U_{ij}(\|p_{ij}\|)$ 公式为

$$\begin{cases}\alpha\ln(\|p_{ij}\|+\delta)^2 + \dfrac{\beta}{(\|p_{ij}\|+\delta)} & 0 < \|p_{ij}\| \leqslant R \\ \alpha\ln(R+\delta)^2 + \dfrac{\beta}{(R+\delta)} & R < \|p_{ij}\| < \infty\end{cases} \tag{7}$$

式中:U_{ij} 为无人机 i 与无人机 j 之间的势能,N 为邻节点数量,α、β 和 δ 均为常数,p_{ij} 为无人机 i 与无人机 j 的相对距离。该式稳定性、鲁棒性可以由文献[18]推导给出,在无人机间距离过小时,施加斥力以避免碰撞,反之施加一定引力以避免无人机离群。

队形保持输入为

$$u_i^{\mathrm{f}} = -\sum_{j=1,j\neq i}^{N} K_p(v_j - u_i^p) \tag{8}$$

$$u_i^p = K_{ij}[(p_i - p_j) - o_i - o_j] \tag{9}$$

式中:K_{ij}为编队系数,K_p 为速度控制系数,o_i 表示无人机 i 的队形偏移量。

式(3)第二项为目标点移动输入,由地面站向集群下发的坐标与速度指令生成。

$$u_i^{\mathrm{t}} = v_i(\boldsymbol{s}) \tag{10}$$

$$v_i(\boldsymbol{s}) = \begin{cases} v_{\mathrm{limit}} \times \dfrac{\boldsymbol{s}}{\|\boldsymbol{s}\|} & \boldsymbol{s} > v_{\mathrm{limit}} \times \mathrm{zoom} \\ \dfrac{\|\boldsymbol{s}\|}{\mathrm{zoom}} \times \dfrac{\boldsymbol{s}}{\|\boldsymbol{s}\|} & \boldsymbol{s} \leqslant v_{\mathrm{limit}} \times \mathrm{zoom} \end{cases} \tag{11}$$

式中:输入项受无人机行进距离与最大速度影响,目的是减少惯性带来的位移偏差;$\boldsymbol{s}$ 为距离目标点偏移量,为矢量;zoom 含义是时间属性,值为最大速度与加速度的商;v_{limit}代表最大速度。

综上,算法流程图如图 4 所示。

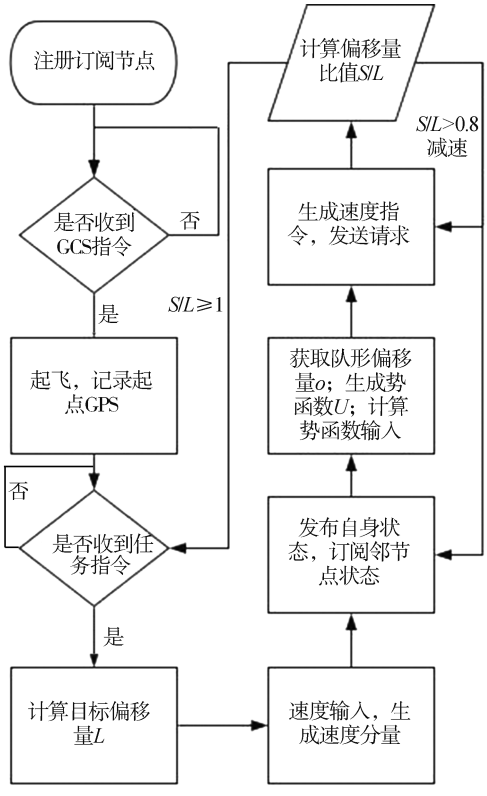


图 4 CVPF 算法流程图

3 DUSS 测试与 CVPF 验证

3.1 实地飞行试验测试

为验证 DUSS 可行性与算法的稳定性,本文使用四轴无人机作为无人机平台,系统实物如图 5 所示。



图 5 试验系统实物图

试验选取 3 架四轴无人机,选定场地进行户外飞行试验,试验目的是在 DUSS 平台上利用一致性联合虚拟势场编队算法实现集群编队飞行与队形切换等功能。通过地面仿真测试获得算法参数取值,并将算法嵌入无人机的机载计算机。实地飞行试验条件如表 1 所示。

表 1 实地飞行试验条件

飞行平台	DJI M300×1、四轴飞行器(A3)×2
地面站	三屏幕笔记本×1
通信频段/GHz	1.4
工作带宽/MHz	20
飞行时长/s	200

DJI M300 与搭载 DJI A3 飞控的四轴飞行器均支持 OSDK 开发模式;试验采用的地面站为一台三屏幕笔记本电脑,与集群组网后使用 NoMachine 进行远程登录,可通过地面站软件一键控制集群;试验前进行通信测试,自组网模块的通信距离在无遮挡条件下为 2 km。各参数取值如表 2 所示。试验步骤如表 3 所示。

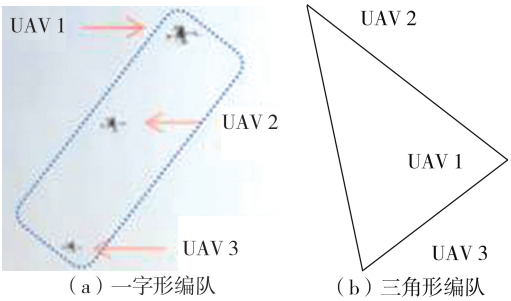
表 2 试验参数取值

参数	取值
α	10
β	0.1
δ	150
$v_{\mathrm{limit}}/(\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1})$	3
最大加速度/$(\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-2})$	5
zoom	0.6
K_{ij}	0.1
K_p	1.2

表 3　实地飞行试验步骤

步骤	操作
试验开始	开机,通信测试
第一步	运行 ros 命令
第二步	运行 rostopic
第三步	参数、状态检查
第四步	GCS 指令发送
第五步	参数、状态监控
第六步	降落

运动坐标系使用东北天坐标系(x 轴正方向为东,y 轴正方向为北,z 轴正方向为天),试验内容包括:起飞、悬停、编队、变换队形、定点飞行、降落。试验流程中进行多次队形变换,包括一字形编队与三角形编队,如图 6 所示。



(a) 一字形编队　　(b) 三角形编队

图 6　编队队形变换

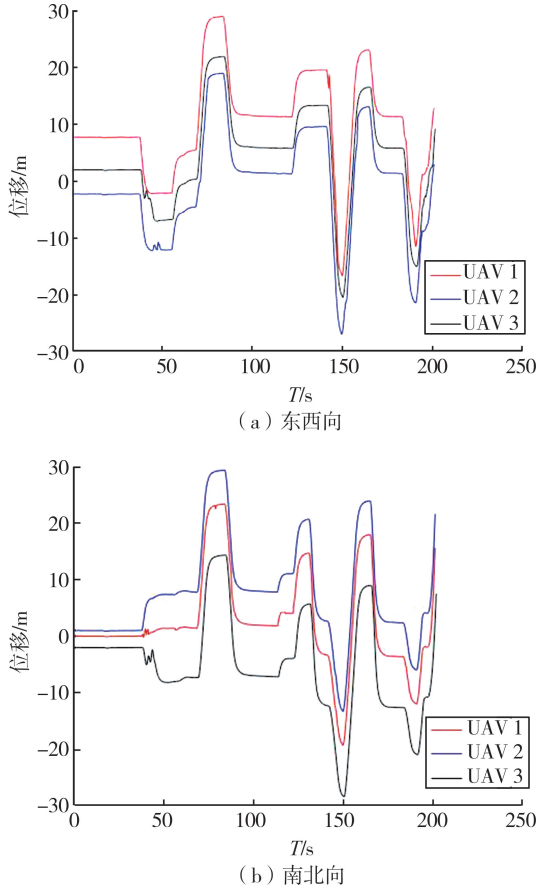
3.2　试验数据分析

试验结束后通过 DJI Assistant2 导出飞行日志,使用 pyulog 将 ulog 日志文件转换为 csv 数据,分析飞行数据(包括速度、位置,试验采取定高飞行,高度为 80 m)。

以东西方向位置-速度、南北方向位置-速度为指标,检验集群是否构成期望队形并且未发生碰撞,使用 Matlab 绘制出图表并进行分析。

图 7 为集群无人机的飞行轨迹,图 8 则表示各无人机在 x 方向(东西)与 y 方向(南北)的实时速度,通过分析飞行数据, DUSS 基本实现了预期功能,编队性能良好且队内无碰撞。图 6 表明 DUSS 队形变换功能良好;图 7、8 表明各节点能够针对地面站指令做出响应,且节点间速度与位置基本符合分布式集群系统一致性要求,内部节点相对距离较为稳定,总体实现了队形保持与变换功能。

通过分析数据曲线并与 Gazebo 仿真对比, DUSS 能够保持期望的位置与速度,队形变换功能良好,但在试验过程中存在通信延迟(200 ~ 600 ms)与节点振荡问题,造成上述误差和节点振荡的原因可以概括为硬件误差、环境因素与算法稳定性问题:数据链通信延迟波动较大且存在丢包现象,导致节点数据更新与接收存在时延;各节点传感器存在误差,相同参数不同节点获取到不同的测量结果,例如 GPS 精度问题;环境因素主要包括风速变化、环境噪声与电磁干扰;算法中势函数易产生振荡,在试验过程中导致节点产生抖动。针对上述问题,可对 DUSS 做出相应改进:使用实时动态差分法(RTK)进行定位以提高定位精度,优化传感器网络能量有限带来的性能约束问题[19];适当增大自组网模块发射功率并且在构型无人机时考虑抗风、抗电磁干扰等环境约束,也可考虑采用变桨距无人机以提升控制品质[20]。

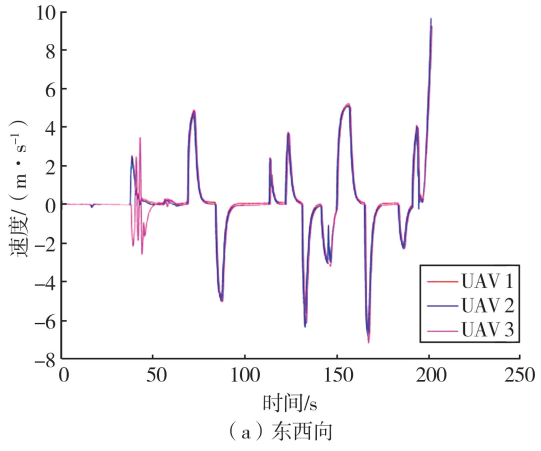


(a) 东西向

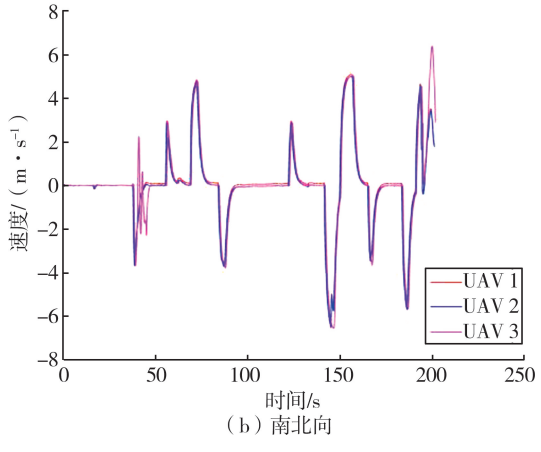
(b) 南北向

图 7　位置一致性

经试验验证,DUSS 具备真实环境下完成飞行任务的能力,与仿真相对比,差异主要体现在真实环境中无法避免的通信延迟与硬件误差方面,其可行性与稳定性验证通过,CVPF 算法经过试验证实其有效性。



(a) 东西向



(b) 南北向

图 8 速度一致性

4 结束语

首先提出了基于 OSDK 的分布式无人机集群控制系统,其次设计一致性联合虚拟势场编队防撞控制算法,最后使用 DUSS 对 CVPF 编队控制算法进行了验证与测试。试验证明,DUSS 作为分布式无人机集群设计方案,可以实现多无人机编队作战、配送与探查任务,并对不同集群控制算法进行可行性验证,以针对性地对算法做出改进,同时系统具有良好的可行性与稳定性;CVPF 算法经过实物试验证实其具有有效性。

未来战争与民生需求引领集群向着高可靠性、自主性、多种类机型编队方向发展,伴随着环境约束随环境变化而增大,无人机集群编队控制技术将受到更严峻的挑战。强鲁棒、高可靠性的异构无人机集群编队控制技术以及对低时延自组网通信的试验研究将成为后续发展要点。

参考文献:

[1] 贾永楠,田似营, 李擎. 无人机集群研究进展综述[J]. 航空学报, 2020, 41(S1): 4-14.
JIA Yongnan, TIAN Siying, LI Qing. Recent development of unmanned aerial vehicle swarms[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(S1): 4-14.(in Chinese)

[2] 阮朗, 李广侠, 吕晶, 等. 一种基于分簇的集群协同定位系统[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2022, 42(2): 31-41.
RUAN Lang, LI Guangxia, LÜ Jing, et al. A clustering-based cooperative localization system for swarm[J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2022, 42(2): 31-41.(in Chinese)

[3] 蒋化南, 张帅, 林宇斐, 等. 基于 MPI 的分布式并行 Gazebo 仿真优化与测试[J]. 计算机科学, 2021, 48(S2): 672-677, 692.
JIANG Huanan, ZHANG Shuai, LIN Yufei, et al. Simulation optimization and testing based on gazebo of MPI distributed parallelism[J]. Computer Science, 2021, 48(S2): 672-677, 692.(in Chinese)

[4] 李银通, 韩统, 聂光成, 等. 多 UCAV 协同打击多目标实时三维航迹规划[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2021, 53(6): 128-137.
LI Yintong, HAN Tong, NIE Guangshu, et al. Real-time 3D trajectory planning of multi-UCAV for cooperative multi-target attacking[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2021, 53(6): 128-137.(in Chinese)

[5] 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.(in Chinese)

[6] RASMUSSEN S J, MITCHELL J W, CHANDLER P R, et al. Introduction to the MultiUAV2 simulation and its application to cooperative control research[C]// American Control Conference. 2005: 4490-4501.

[7] PUJOL-GONZALEZ M. Scaling DCOP algorithms for cooperative multi-agent coordination[J]. Constraints, 2015, 20(4): 496-497.

[8] 朱创创, 梁晓龙, 张佳强, 等. 无人机集群编队控制演示验证系统[J]. 北京航空航天大学学报, 2018, 44(8): 1739-1747.
ZHU Chuangchuang, LIANG Xiaolong, ZHANG Jiaqiang, et al. Demonstration and verification system for UAV swarm formation control[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2018, 44(8): 1739-1747.(in Chinese)

[9] 刘云平, 蒋长胜, 张婷婷, 等. 考虑内部避碰的多无人机有限时间环形编队控制[J]. 机械工程学报, 2022, 58(1): 61-68.
LIU Yunping, JIANG Changsheng, ZHANG Tingting, et al. Multi-UAV finite-time ring formation control considering internal collision avoidance [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(1): 61-68.(in Chinese)

[10] 蒋祎, 廖俊, 陈琪峰. 旋翼无人机航迹控制半实物仿真系统设计[J]. 计算机仿真, 2019, 36(3): 27-31.
JIANG Yi, LIAO Jun, CHEN Qifeng. Hardware-in-loop simulation system for small rotor UAV based on JMAVSim [J]. Computer Simulation, 2019, 36(3): 27-31.(in Chinese)

[11] 邹立岩, 张明智, 柏俊汝, 等. 无人机集群作战建模与仿真研究综述[J]. 战术导弹技术, 2021(3): 98-108.
ZOU Liyan, ZHANG Mingzhi, BAI Junru, et al. A survey of modeling and simulation of UAS swarm operation[J]. Tactical Missile Technology, 2021(3): 98-108.(in Chinese)

[12] 王豪, 黄健, 黄祥, 等. 一种利用 Unity3D 模拟崩塌三维运动全过程的方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2021,DOI:10.13203/j.whugis20210237 .
WANG Hao, HUANG Jian, HUANG Xiang, et al. A method of using Unity3D to simulate the whole process of three-dimensional movement of rockfall [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, DOI:10.13203/j.whugis20210237.(in Chinese)

[13] 张伟, 庄幸涛, 王雪力, 等. DS-YOLO: 一种部署在无人机终端上的小目标实时检测算法[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2021, 41(1): 86-98.
ZHANG Wei, ZHUANG Xingtao, WANG Xueli, et al. DS-YOLO: a real-time small object detection algorithm on UAVs[J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2021, 41(1): 86-98.(in Chinese)

[14] 费思远, 鲜斌, 王岭. 基于群集行为的分布式多无人机编队动态避障控制[J]. 控制理论与应用, 2022, 39(1): 1-11.
FEI Siyuan, XIAN Bin, WANG Ling. Distributed formation control for multiple unmanned aerial vehicles with dynamic obstacle avoidance based on the flocking behavior [J]. Control Theory & Applications, 2022, 39(1): 1-11.(in Chinese)

[15] 陈昕, 张鑫, 金鑫, 等. 一种多智能体协同信息一致性算法[J]. 航空学报, 2017, 38(12): 321222.
CHEN Wu, ZHANG Xin, JIN Xin, et al. A cooperative information consensus algorithm for multi-agent system [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017, 38(12): 321222.(in Chinese)

[16] 蒲良, 张学军. 基于深度学习的无人机视觉目标检测与跟踪[J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48(5): 872-880.
PU Liang, ZHANG Xuejun. Deep learning based UAV vision object detection and tracking[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 48(5): 872-880.(in Chinese)

[17] 李安醒, 武丁杰, 李诚龙. 低空无人机自主避障算法综述[J]. 电光与控制, 2021, 28(8): 59-64.
LI Anti, WU Dingjie, LI Chenglong. A survey on autonomous collision avoidance algorithms for UAVs at low altitude[J]. Electronics Optics & Control, 2021, 28(8): 59-64.(in Chinese)

[18] HE L L, BAI P, LIANG X L, et al. Feedback formation control of UAV swarm with multiple implicit leaders [J]. Aerospace Science and Technology, 2018, 72: 327-334.

[19] 孙颖, 陈思光. 基于无人机工作模式选择的无线传感器网络数据传输[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2021, 41(6): 75-83.
SUN Ying, CHEN Siguang. UAV working modes selection based data transmission for wireless sensor networks [J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2021, 41(6): 75-83.(in Chinese)

[20] 赵勃, 徐丰羽, 岳东, 等. 变桨距多旋翼无人机研究进展[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2021, 41(4): 91-98.
ZHAO Bo, XU Fengyu, YUE Dong, et al. Recent advances on variable-pitch multi-rotor UAVs[J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2021, 41(4): 91-98.(in Chinese)

(责任编辑:李小溪)