

基于 CVPF 算法的无人机编队系统设计

张弘达^{1,2}

(1. 江西核工业测绘院集团有限公司, 南昌 330199;

2. 东华理工大学 测绘与空间信息工程学院, 南昌 330199)

摘要: 随着互联网和通信技术的不断发展, 无人机被广泛应用于各个领域; 但现有的无人机编队控制方法, 稳定性较差, 无法保持良好的位置和速度一致性; 因此研究提出了基于一致性联合虚拟势场的无人机编队控制方法, 该方法将人工势场法与一致性控制原理融合, 对目标不可达进行优化, 引入惯性偏移量解决无人机惯性问题, 并设计了无人机编队控制系统; 实验结果表明, 无人机在 x 和 y 轴方向的位置一致性测试性能良好, 无人机 3 在 30 s 时 y 轴方向位移出现波动, 最大差值 10 m; 无人机编队的实际悬停位置与期望悬停位置误差为 0.16 m, 无人机 3 在 x 和 y 轴方向都出现的速度波动, 与其他无人机速度方向相反, 最大差值分别为 6.2 m/s 和 5.8 m/s, CVPF 算法的编队变换速度分别比其他算法快了 1.6 s、1.2 s、1.8 s 以及 2.0 s, 计算复杂性仅比长机一僚机法高出 6 ms; 由此可得, 研究提出的算法能够有效控制无人机编队的位置和速度一致性, 防止出现安全事故, 解决了惯性和目标不可达问题。

关键词: 无人机集群; 一致性; 分布式通信; 虚拟势场; 编队控制

Design of UAV Formation System Based on CVPF Algorithm

ZHANG Hongda^{1,2}

(1. Jiangxi Nuclear Surveying and Mapping Institute Group Co., Ltd., Nanchang 330199, China;

2. School of Geomatics and Spatial Information Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330199, China)

Abstract: With the continuous development of Internet and communication technology, unmanned aerial vehicles (UAVs) are widely used in various fields. However, existing UAV formation control methods have the characteristics of poor stability and inability to maintain good consistency of position and velocity. Therefore, a UAV formation control method based on coherent joint virtual potential field is proposed. This method integrates the artificial potential field method with the coherent control principle, optimizes the unreachability of the target, introduces an inertial offset to solve the inertia problem of the UAV, and designs a UAV formation control system. Experimental results show that the UAVs have good performance in the position consistency test in the x and y -axis directions, and the displacement of the UAV 3 fluctuates in the the y -axis direction at 30.0 s, with a maximum difference of 10.0 m. The actual hovering position and desired hovering position error of the UAV formation is 0.16 m, and the velocity of the UAV 3 fluctuates in both the x and y -axis directions, compared to other UAVs, the maximum errors are 6.2 m/s and 5.8 m/s in the opposite direction of velocity, respectively. The formation transformation speed of consensus virtual potential field (CVPF) algorithm is 1.6 s, 1.2 s, 1.8 s, and 2.0 s faster than that of other algorithms, respectively, and the computational complexity is only 6 ms higher than that of the chief and wingman method. It can be concluded that the proposed algorithm can effectively control the position and velocity consistency of UAV formation, prevent safety accidents, and solve the problems of inertia and unreachable targets.

Keywords: UAV cluster; consistency; distributed communication; virtual potential field; formation control

0 引言

无人机的发展最早可以追溯到 20 世纪初, 起初只是在军事领域, 如无人机侦查和打击等^[1]。在 20 世纪末逐渐进入民用领域, 通常用来进行航拍、农作物播种、药物喷洒以及电力巡检和警务安防等^[2]。无人机能够大幅提升工作效率, 降低工作成本和风险^[3]。在 21 世纪初, 随着人工智能、机器学习以及 5G 技术的不断发展, 无人机也朝着自主决策和智

能化的方向发展, 同时也会与各行各业进行更加紧密的结合^[4-5]。编队无人机从多个角度对目标进行观察和测量, 提高定位精度, 同时, 从多角度进行打击能够提升命中率和杀伤力。无人机在民用领域可以进行编队飞行表演、编队植保以及搜索救援等^[6]。而无人机的编队控制一直是无人机研究领域中的关键技术, 但现有控制方法往往存在稳定性较差和目标不可达等问题。针对无人机编队控制和避障问题, 文献

收稿日期: 2024-10-29; 修回日期: 2024-11-01。

作者简介: 张弘达 (1990-), 男, 大学本科, 工程师。

引用格式: 张弘达. 基于 CVPF 算法的无人机编队系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(11): 322-327.

[7] 为了解决无人机集群中的编队控制和避障问题, 提出了一种基于虚拟子目标联合边界力的无人机避障算法。该算法使用虚拟子目标的领航跟随方法, 优化修正力函数, 采用基于边界力的人工势场法进行局部路径规划。实验表明, 该方法具有较高的编队队形一致性和时间效率, 能够有效解决目标不可达问题^[7]。文献 [8] 为了解决多机器人系统面对位置障碍物的编队避障问题, 提出了一种多移动机器人混合避障算法编队策略。该策略将机器人划分为领航节点和跟随节点, 算法改进人工势场法的斥力函数, 使用一致性模型控制机器人移动速度。仿真结果表明, 该策略能够解决传统方法的局部极值困境问题, 有效缩短避障所花费的时间^[8]。文献 [9] 为了解决无高精度定位时的无人机编队保持和避障问题, 提出了一种新的无人机编队定位方法。该方法采用激光雷达作为位置传感器, 使用 K-means 算法计算中心点, 通过最优策略控制无人机集群在飞行中保持队形。实验表明, 该方法在全球定位系统缺失的环境中能够有效保障无人机的飞行队列^[9]。文献 [10] 为了解决旋翼无人机的编队控制问题, 提出了一种神经自适应分布编队控制方法。该方法采用基于反步的虚拟位置控制器解决耦合约束, 使用相邻无人机的信息进行自身的位置和速度更新, 通过自适应滑模控制器对不确定性进行补偿。实验表明, 该方法拥有良好的跟踪性能, 能够有效完成无人机的编队队形控制^[10]。

针对无人机路径规划问题, 文献 [11] 为了解决无人机路径规划的全局寻优能力和寻优速度, 提出了一种新的旋转人工势场方法。该方法引入新的势场函数来解决局部最小值问题, 利用刺激旋转斥力解决障碍物附近目标不可达问题。实验表明, 该方法具有更高的避障能力, 更短的运行时间和更高的成功率^[11]。文献 [12] 为了解决无人机的实时路径规划和障碍物区分问题, 提出了一种新的动态分数排斥势场。该势场充分考虑了障碍物的动态情况和危险程度, 从安全和轨迹优化角度保证无人机避障的鲁棒性, 同时, 在障碍物的定义中引入分数度。实验表明, 该势场能够有效区分障碍物的危险程度, 并据此实时更新斥力大小^[12]。文献 [13] 针对无人水面飞行器路径规划中存在的局部最小值和目标不可达问题, 提出了一种新的考虑虚拟目标的路径规划算法。该算法建立斥力势场函数, 采用模拟退火算法和人工势场法求解最小点问题, 利用虚拟目标点算法解决局部最小值问题。实验表明, 该算法能够有效解决排斥力过大引起的规划路径过长问题, 算法运行数据缩短了 33.4%^[13]。

综上所述, 现有的研究方法从多方面探讨了无人机路径规划、编队控制以及避障问题, 且取得了一定的成效, 但算法的编队控制稳定性较差, 对目标不可达和惯性优化未达到期望值。因此研究基于一致性联合虚拟势场 (CVPF, consensus virtual potential field) 编队控制算法设计了无人机编队控制系统, 创新地采用分布式控制构建出 CVPF 编队算法, 对人工势场法进行改进, 优化目标不可达问题, 引入惯性偏移量。研究旨在提升无人机编队控制的稳定性, 提升飞行精

度, 提高控制效率。

1 编队控制算法研究

1.1 构建 CVPF 编队算法

编队无人机控制和单个无人机控制存在较大的差异, 编队无人机需要考虑相互之间的沟通和协调, 不同无人机之间的位置动态变化。同时, 在个别无人机发生故障后, 剩余无人机能够及时对任务进行重新规划, 填补空缺, 确保任务顺利完成^[14]。这就需要无人机编队控制系统具有较低的通信延迟、较高的抗干扰能力以及无人机的速度和位置变化的一致性。研究采用分布式通信结构进行无人机之间的信息交流, 确保无人机编队的各项数据保持一致。研究将每架无人机作为一个信息传输节点, 采用分布式通信进行节点之间的连接, 每架无人机的相邻节点表示如式 (1) 所示^[15]:

$$N_i = \{j: \|x_i - x_j\| < S, i \neq j\} \quad (1)$$

式中, N_i 表示无人机 i 的相邻无人机集合, j 表示相邻无人机, x_i 表示无人机 i 的位置, x_j 表示相邻无人机 j 的位置, S 表示无人机的最大通信距离。研究将无人机的飞行速度设置为一个范围固定的值, 采用微分方程构建无人机编队控制的线性运动模型, 运动模型的二阶积分如式 (2) 所示:

$$\begin{cases} \dot{x} = v_i \cos \omega_i \\ \dot{y} = v_i \sin \omega_i \end{cases} \quad (2)$$

式中, \dot{x} 表示无人机 x 方向变化量的一阶导数, \dot{y} 表示无人机 y 方向变化量的一阶导数, v_i 表示无人机的速度, ω_i 表示自然振荡频率。无人机的编队一致性目标就是采集当前无人机的状态, 与期望无人机状态进行对比, 计算出编队以及相邻无人机之间的状态误差值, 使得误差值逐渐降低至零。研究将无人机编队的一致性转换为速度和位置一致性, 无人机的二维动力学模型如式 (3) 所示:

$$\begin{cases} \dot{s} = v_i \\ \dot{v} = u_i \end{cases} \quad (3)$$

式中, \dot{s} 表示二阶系统中无人机位置的一阶导数, \dot{v} 表示无人机速度的一阶导数, u_i 表示第 i 架无人机的控制输入。其中 u_i 计算如式 (4) 所示:

$$u_i = u_i^s + u_i^v + u_i^c \quad (4)$$

式中, u_i^s 表示无人机 i 的相邻节点势场函数输入, u_i^v 表示无人机编队队形控制输入, u_i^c 表示单个无人机自身控制输入。其中的势场函数输入是为了引导无人机躲避沿途的障碍物并向着目标点前进, 函数又分为引力场和斥力场。当无人机距离目标较远时, 引力作用较大, 引导无人机向目标方向运动, 当无人机距离障碍物较近时, 斥力较大, 引导无人机避开障碍物。队列控制输入是为了控制无人机编队的速度和位置一致性, 确保队列的完整性, 当队列中的某个无人机因干扰信号脱离编队时, 其余无人机能及时调整编队, 保证飞行任务能够完成。无人机编队的网络连接结构可以通过一个包含若干节点的有向图来表示, 采用权重矩阵对无人机的位置进行定义, 当无人机位置权重与中转节点进行数据交流时, 位置

权重的值为 1，否则为 0。根据李雅普诺夫理论可得，当无人机的位置平衡点存在时，随着时间 t 趋近于无穷，无人机无论处于哪种初始状态，都能够接近位置平衡点^[16]。同理，在任何状态下的无人机初始速度都能够接近速度平衡点。无人机编队队形保持输入计算如式 (5) 所示：

$$\begin{cases} u_i^v = - \sum_{j=1}^n Q_p (v_j - u_i^v) \\ u_i^p = Q_{ij} (\|p_i - p_j\| - f_i - f_j) \end{cases} \quad (5)$$

式中， n 表示无人机总数， Q_p 表示速度控制系数， v_j 表示无人机 j 的速度， u_i^v 表示无人机编队位置一致性输入， Q_{ij} 表示编队控制系数， p_i 表示无人机 i 的位置， p_j 表示无人机 j 的位置， f_i 表示无人机 i 的队形偏差， f_j 表示无人机 j 的队形偏差。当两架无人机之间的距离增加时，位置一致性输入相应变大，使得两架无人机逐渐靠近。当机间距离因环境影响而减小时，位置一致性输入相应变小，根据预设队形，在无人机编队内部对位置一致性输入进行调整，满足队形控制要求。

1.2 优化算法

在传统的无人机控制人工势场法中，因为障碍物的斥力影响，存在目标不可达问题，因此需要对其进行优化。人工势场法将无人机看作势场中的一个点，预定的目标位置对无人机产生引力势场，吸引无人机靠近目标位置，飞行途径周围的障碍物对无人机产生斥力势场，阻止其靠近。无人机编队内部为引力和斥力势场同时存在。当机间距离较大时为引力势场，吸引两架无人机相互靠近，当机间距离小于安全飞行距离时，转换为斥力势场，两架无人机逐渐远离，避免发生碰撞。通过两种势场构造势场函数，来控制无人机编队的位置和速度。根据预设的出发位置和目标位置，研究采用梯度下降法求解无人机飞行路径中的势场最小值，无人机在某处的引力场势函数如式 (6) 所示^[17]：

$$U_a = \frac{1}{2} \zeta \|p_i - p_j\|^2 \quad (6)$$

式中， U_a 表示引力场势函数， ζ 表示引力增益，无人机在该处所受的引力计算如式 (7) 所示：

$$F_a = -\zeta(p_i - p_j) \quad (7)$$

式中， F_a 表示无人机在该处受到的引力。无人机所受斥力在无人机与障碍物的距离小于临界点时，斥力较大使得其远离障碍物，当距离大于临界点时，无人机所受斥力非常小或忽略不计。无人机在某处的斥力场势函数如式 (8) 所示：

$$\begin{cases} U_r = \frac{1}{2} \eta \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{d'} \right)^2, d' \leq d \\ U_r = 0, d' > d \end{cases} \quad (8)$$

式中， U_r 表示斥力场势函数， η 表示斥力增益， d 表示临界距离， d' 表示该处到目标点的距离。无人机在该处所受的斥力计算如式 (9) 所示：

$$F_r = -\eta \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{d'} \right) \frac{1}{d'^2} \nabla d' \quad (9)$$

式中， F_r 表示无人机在该处受到的斥力， ∇ 表示梯度算子。为优化人工势场法的目标不可达问题，将不在飞行路径上障碍物施加的斥力势场忽略，保留无人机编队内部势场和目标点引力势场。无人机在到达目标点后，由于惯性影响，实际悬停位置与期望悬停位置存在一定的差异，当无人机空载时，这种差异的影响较小。但是当无人机因为执行打击或勘察等任务时，随着负荷量的提升，惯性也会因重量的增加而增加，误差就会变得更大。同时，由于无人机编队有多架无人机组成，单个无人机的偏差将会影响其相邻节点的悬停位置，从而导致整个编队的飞行出现误差。因此，为了实现无人机编队的精确定位以及悬停，研究需要考虑不同载重量对无人机惯性的影响^[18]。研究根据单个无人机的自身控制输入 u_i^v ，设置无人机的惯性偏移量，计算如式 (10) 所示：

$$J = \frac{v_{\max}}{a} \quad (10)$$

式中， J 表示无人机的惯性偏移量， v_{\max} 表示无人机的最大速度， a 表示无人机的加速度。引入惯性偏移量的无人机自身控制输入计算如式 (11) 所示^[19]：

$$u_i^v = v'_i = \begin{cases} v_{\max} \cdot \frac{s_p}{\|s_p\|}, s_p > v_{\max} \cdot J \\ \frac{\|s_p\|}{J} \cdot \frac{s_p}{\|s_p\|}, s_p \leq v_{\max} \cdot J \end{cases} \quad (11)$$

式中， v'_i 表示无人机的实时飞行速度， s_p 表示时间位置与期望位置的偏移量。当无人机的偏移量大于惯性偏移量与最大速度的积时，无人机的飞行速度不会受到影响，依旧以当前速度飞行。当无人机的偏移量小于等于惯性偏移量与最大速度的积时，为了降低惯性造成的位移误差值，无人机的飞行速度与目标偏移量成正相关，无人机越接近目标，飞行速度就越慢。一致性联合虚拟势场编队控制算法具体运行流程如图 1 所示。

在图 1 中，接收到地面站点发布的移动命令后，输入无人机的一致性控制输入和邻节点势函数，对邻节点势场函数输入、队形控制输入以及无人机自身控制输入进行初始化处理。根据无人机偏移量与惯性偏移量和最大速度的积的大小关系，确定无人机的速度是继续保持还是逐渐降低。判断机间距离与安全距离的大小，调整邻节点势函数的输入，判断无人机与障碍物的距离，大于临界距离则

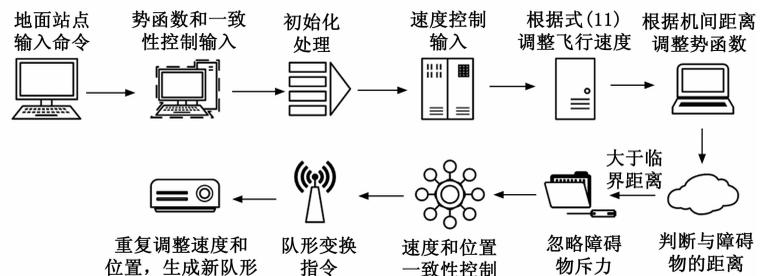


图 1 一致性联合虚拟势场编队控制算法运行流程

略障碍物斥力影响。根据上述控制输入完成无人机速度和位置的一致性控制，如果地面站点发布队形变换指令，则重新调整位置和速度，生成新队形。

2 无人机编队控制系统设计

无人机编队控制通常有集中式控制和分布式控制两种，集中式控制的所有信息都由中心节点进行处理，并做出相应的决策。虽然控制精度较高，但受到中心节点计算能力的限制，不能进行大规模的无人机编队控制，且中心节点一旦受到干扰，就会使整个系统失效。而分布式控制对计算能力要求较低，且能够快速获取周围信息与相邻节点进行信息交互和协调。分布式控制在复杂多变的环境中拥有较强的适应性和可靠性，且具有良好的可扩展性。研究采用机器人操作系统（ROS, robot operating system）用以进行无人机编队的分布式控制，ROS 的运行方式包括基于服务的同步远程过程调用通信、基于 Topic 的异步数据流通信以及参数服务器上的数据存贮。

研究采用 ROS 中的发布/订阅模式进行节点之间的通信，其中一个节点发布信息后，周围节点通过订阅获取这些信息并进行处理。通过 ROS 的分布式通信特征，多个计算中心周围的所有节点都能够实现任意两个节点之间的信息传递^[20]。为了实现分布式系统中节点间的通信，需要设置固定的 IP 地址和端口号，以便节点可以互相发现并建立连接。每个节点都需要配置一个可以通过网络解析的名称，以便其他计算机能够识别。设置完成后，需要检查网络的连通性，并测试网络的速度，以确保节点之间的通信顺畅。根据模块化思想，研究将设计的无人机编队控制系统分为控制模块、监测模块以及操作模块。监测模块即地面控制站点，站点通过机器人操作系统的订阅机制，实时获取各个无人机节点发布的状态信息，包括速度、位置以及周边环境等，站点通过发布机制传达相关飞行命令。无人机编队控制系统中的控制模块订阅到地面站点的飞行指令后，通过无人机机载计算机程序开发工具 Onboard SDK 将飞行指令传输至无人机的操作模块。操作模块对指令进行计算后，实时生成无人机的位置和速度控制信息，完成无人机的轨迹规划、速度变化以及编队控制等。研究设计的无人机编队控制系统飞行流程如图 2 所示。

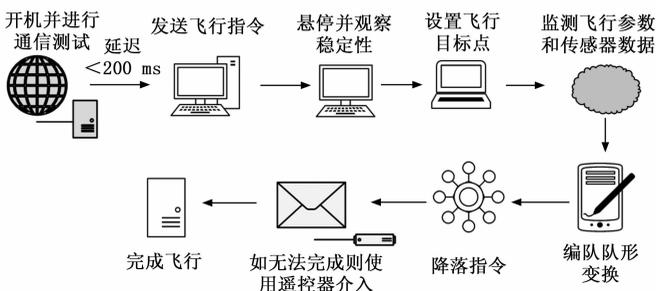


图 2 无人机编队控制系统飞行流程

在图 2 中，在单个无人机出现故障时，可以由遥控器介入并操控无人机脱离编队完成降落，减少因出现故障造成的成本损失。编队飞行前将站点主机、无人机以及机载计算机开机，测试通信情况，如各个节点之间的通信延迟小于 200 ms，则可以开始进行飞行。启动后在各节点之间建立发布/订阅关系，方便信息传输。地面站点发送飞行指令，无人机升空后悬停 30 s，观测各无人机的稳定性。稳定性无误后设定飞行目标点，无人机实时回传飞行过程中的各项参数和机体状态，地面站点适时发布编队队形变换指令。无人机到达目标点后，记录各项数据，包括时间悬停点与期望悬停点的 x 和 y 方向位置差值等，飞行完成后，无人机返回并降落。机载计算机是分布式架构的计算中心，无人机编队的规模的队形复杂度与其计算能力密切相关，无人机的机载计算机选择大疆妙算 Manifold 2，与 Onboard SDK 的 UART 0 接口的通信波特率设置为 115 200 波特。Manifold 2 能够连接多种扩展单元，提高无人机的适用性。

3 无人机编队控制系统实验分析

3.1 系统仿真测试

为了保障实地测试时的飞行安全，以及确定 CVPF 算法的各项参数取值，研究先采用基于 ROS 系统的 Gazebo 软件进行仿真测试，该软件可以进行硬件在环仿真和软件在环仿真，同时模拟无人机的飞行状态以及测试编队控制算法。仿真实验场地采用多个柱形障碍物进行模拟飞行实验，实验使用的处理器为 i7-12400F，CPU 主频 2.5 GHz，6 核 12 线程，仿真飞行时长为 100 s。研究设计的 CVPF 无人机编队控制系统实物如图 3 所示。

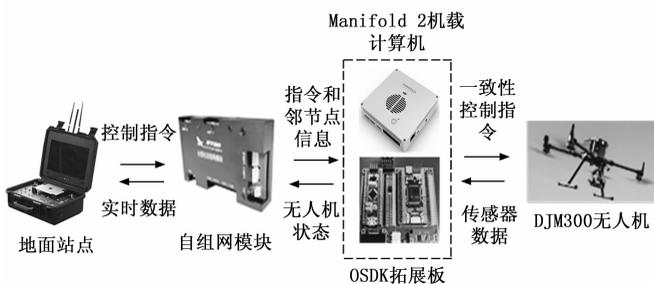


图 3 CVPF 无人机编队控制系统实物图

在图 3 中，无人机编队的自组网模块选择汉华高科的 HanhGk-2110097HW，功率为 10 W，传输速率为 1.2 Mbps，机载计算机为大疆妙算 Manifold 2，重量为 230 g，处理器为 NVIDIA Jetson TX2，最大传输速度为 866.7 Mbps。无人机编队的仿真测试结果如图 4 所示。

在图 4 (a) 中，在 40 s 之前，各个无人机的 x 轴飞行轨迹较为杂乱，是因为在升空时和升空后的一段时间进行了队形的变换，在 60 s 之后，3 架无人机的运行轨迹相对较为平稳，无人机之间的 x 轴距离基本保持不变。在图 4 (b) 中，在前 50 s，3 架无人机的 y 轴运行轨迹有一次交汇点，但因为无人机编队变换队形时，在 z 轴方向的距离始终保

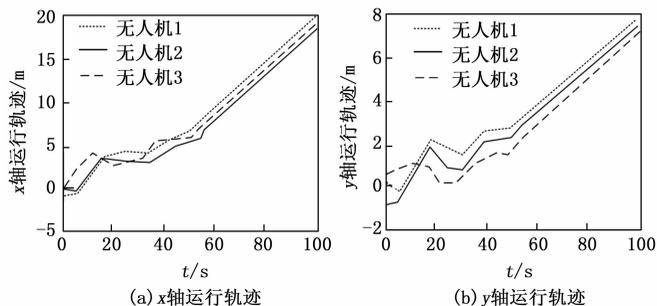


图 4 无人机编队的仿真测试结果

持在安全距离之内，没有碰撞风险。在飞行 50 s 之后，3 架无人机的 y 轴运行轨迹较为平稳，距离基本保持稳定。同时，通过仿真实验确定了 CVPF 算法的各项参数的最优值，其中惯性偏移量 J 的最优值为 0.6，速度控制系数 Q_p 最优值为 1.2，编队控制系数 Q_{ij} 最优值为 0.1，最大速度 v_{max} 为 3 m/s。

3.2 实地测试

实地飞行实验的各项设备与仿真实验相同，CVPF 算法的参数采用仿真实验测得的最优值，实验无人机为 3 架 DJ M300 四旋翼无人机。研究设计的 CVPF 算法在机载计算机上运行，完成通信测试后正式开始实验，实验采用的对比无人机编队控制算法包括基本行为法、长机一僚机法、虚拟结构法以及人工势场法。无人机编队的位置一致性实地测试结果如图 5 所示。

在图 5 (a) 中，无人机在 x 轴方向的位置一致性测试性能良好，在平稳飞行时机间距离基本保持不变，无人机 1 和 3 在部分位置出现位移波动，但很快就进行了自我调整，且位移波动时机间距离一直在安全范围内，未发生碰撞。在进行编队队形变换时，无人机的稳定性和变换速度性能良好，未出现碰撞风险。在图 5 (b) 中，在 30 s 之前，无人机 3 的位置一致性与其他两架无人机相差较大，y 轴方向位移最大差值超过 10 m，但经过调整后，在 40 s 左右 y 轴位置一致性恢复正常，后续一直保持相对平稳，无人机的稳定性表现良好。在图 5 (c) 中，无人机的实际悬停位置

与期望悬停位置之间的误差为 0.16 m，无人机编队全部到达目标区域，误差在可接受范围内。无人机编队的速度一致性实地测试结果如图 6 所示。

在图 6 (a) 中，在 30 s 左右时，无人机 3 的 x 轴方向速度出现波动，与无人机 1 和 2 的速度相反，最大差值为 6.2 m/s，但经过调整后，后续 3 架无人机的 x 轴方向速度一致性一直处于较为平稳的状态。说明无人机编队能够保持良好的速度一致性，且避免碰撞事故的发生。在图 6 (b) 中，y 轴方向无人机 3 的速度波动同样发生在 30 s 左右，总共出现两次方向相反的速度波动，最大差值为 5.8 m/s。后续 3 架无人机能够保持良好的速度一致性直到完成飞行。不同算法的无人机编队飞行性能测试结果如表 1 所示。

表 1 不同算法的无人机编队飞行性能测试结果

算法	最大位移差值/m	最大速度差值/(m/s)	编队变换速度/s	飞行时间/s	计算复杂性/ms
基本行为法	9.5	5.1	5.2	96	62
长机一僚机法	11.4	6.3	4.8	102	18
虚拟结构法	10.9	6.0	5.4	106	58
人工势场法	12.6	7.6	5.6	115	27
CVPF 算法	10.2	6.2	3.6	100	24

在表 1 中，CVPF 算法的最大位移差值优于其他方法，只比基本行为法高出 0.7 m，最大速度差值分别比长机一僚机法和人工势场法低了 0.1 m/s 和 1.4 m/s。CVPF 算法的编队变换速度是最快的，分别比其他算法快了 1.6 s、1.2 s、1.8 s 以及 2.0 s，在相同起始点和终点时，需要的飞行时间比其他算法更短。CVPF 算法的计算复杂性仅比长机一僚机法高出 6 ms，比其他算法计算所需时间更短。

4 结束语

针对无人机编队控制方法稳定性较差以及目标飞行精度低等问题，研究基于一致性联合虚拟势场的编队控制算法。实验结果表明，在仿真实验中，无人机编队升空和队形变换时，飞行轨迹较为杂乱，但飞行稳定之后，3 架无人机的运行轨迹相对较为平稳，无人机之间的 x 轴和 y 轴距离基本保持不变，机间距离始终保持在安全距离之内，没

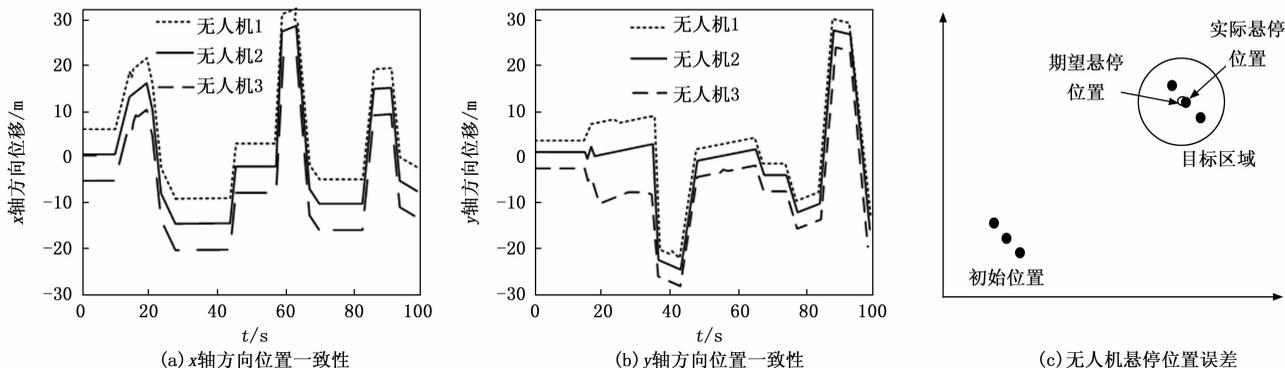


图 5 无人机编队位置一致性测试结果

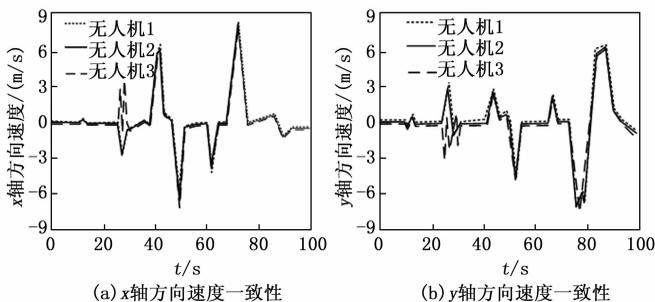


图 6 无人机编队的速度一致性实地测试结果

有碰撞风险。在实地实验中, 无人机在 x 轴方向的位置一致性测试性能良好, 飞行时机间距离基本保持不变。无人机 3 在 30 s 时 y 轴方向位移出现波动, 与其他无人机的最大差值超过 10 m, 但经过调整后快速恢复平稳。无人机编队全部到达目标区域, 实际悬停位置与期望悬停位置误差为 0.16 m, 可接受范围内。在飞行时间 30 s 左右, 无人机 3 在 x 轴和 y 轴方向都出现的速度波动, 与其他两架无人机的速度方向相反, 最大差值分别为 6.2 m/s 和 5.8 m/s。CVPF 算法的编队变换速度分别比其他算法快了 1.6 s、1.2 s、1.8 s 以及 2.0 s, 计算复杂性仅比长机一僚机高出 6 ms。且在实地飞行过程中, 一直未出现碰撞风险, 机间距离一直保持在安全范围内。此次研究还存在一些问题, 研究只考虑了二维层面中的编队控制问题, 后续可以加入三维立体编队飞行控制, 提高无人机编队在复杂环境中针对突发情况的应变能力。

参考文献:

[1] 张钟元, 戴炜, 李光昱, 等. 基于改进人工势场和一致性协议的协同避障算法 [J]. 计算机应用, 2023, 43 (8): 2644-2650.

[2] 杨永刚, 龚泽川, 谢睿夫. 基于改进势场和一致性的无人机编队避障方法 [J]. 电光与控制, 2024, 31 (7): 36-41.

[3] 张玉超, 蒋沅, 代冀阳. 三阶多机器人协同编队动态避障控制 [J]. 系统仿真学报, 2022, 34 (8): 1762-1774.

[4] 李亚文, 张鹏飞, 何印, 等. 改进 APF 的无人机编队避障最优一致性控制方法 [J]. 航天控制, 2024, 42 (1): 17-23.

[5] OUYANG Q, WU Z, CONG Y, et al. Formation control of unmanned aerial vehicle swarms: A comprehensive review [J]. Asian Journal of Control, 2023, 25 (1): 570-593.

[6] YAN Z, HAN L, LI X, et al. Event-triggered formation control for time-delayed discrete-time multi-agent system applied to multi-UAV formation flying [J]. Journal of the Franklin Institute, 2023, 360 (5): 3677-3699.

[7] 王曼, 李大鹏, 丁良辉, 等. 基于虚拟子目标联合边界力的编队避障算法 [J]. 系统仿真学报, 2023, 35 (9): 1918-1930.

[8] 刘福琳, 李庆鑫. 多移动机器人混合避障算法的编队策略 [J]. 系统仿真学报, 2024, 36 (3): 726-734.

[9] Bodi MA, Zhenbao LI, Jiang F, et al. Reinforcement learning based UAV formation control in GPS-denied environment [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2023, 36 (11): 281-296.

[10] YU Y, GUO J, AHN CK. Neural adaptive distributed formation control of nonlinear multi-UAVs with unmodeled dynamics [J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2022, 34 (11): 9555-9561.

[11] WU Z, DONG S, YUAN M, et al. Rotate artificial potential field algorithm toward 3D real-time path planning for unmanned aerial vehicle [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2023, 237 (4): 940-955.

[12] VICTOR S, RUIZ K, MELCHIOR P, et al. Dynamical repulsive fractional potential fields in 3D environment [J]. Fractional Calculus and Applied Analysis, 2022, 25 (2): 321-345.

[13] LUAN T, TAN Z, YOU B, et al. Path planning of unmanned surface vehicle based on artificial potential field approach considering virtual target points [J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2024, 46 (6): 1190-1202.

[13] 郭洪振, 陈谋, 戴永东, 等. 分布式自适应事件触发四旋翼无人机编队控制 [J]. 航空学报, 2023, 44 (s2): 491-500.

[14] 钱贝, 周绍磊, 肖支才, 等. 通信时延条件下的单一领导者多无人机系统编队控制 [J]. 电光与控制, 2023, 30 (5): 66-72.

[15] 康宇航, 毛凯, 程俊, 等. 联合连通有向切换拓扑条件下无人机集群鲁棒编队控制 [J]. 中国科学: 技术科学, 2023, 53 (12): 2115-2126.

[16] 郑伟铭, 徐扬, 罗德林. 未知干扰下四旋翼无人机群固定时间编队控制 [J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 50 (5): 1702-1712.

[17] LIU Y, LIU J, HE Z, et al. A survey of multi-agent systems on distributed formation control [J]. Unmanned Systems, 2024, 12 (05): 913-926.

[18] LI Y, KARIM M M, QIN R. A virtual-reality-based training and assessment system for bridge inspectors with an assistant drone [J]. IEEE transactions on human-machine systems, 2022, 52 (4): 591-601.

[19] GARIBEH M H, ALSHORMAN A M, JARADAT M A, et al. Motion planning of unmanned aerial vehicles in dynamic 3D space: a potential force approach [J]. Robotica, 2022, 40 (10): 3604-3630.

[20] COSTA A N, MEDEIROS F L, DANTAS J P, et al. Formation control method based on artificial potential fields for aircraft flight simulation [J]. Simulation, 2022, 98 (7): 575-595.