

# 基于速度前馈的无人机编队控制

祁亚辉, 狄凌松, 闫实, 吴修振, 孙德锋

(海军航空大学, 山东烟台 264001)

**摘要:** 对旋翼无人机编队控制进行了研究, 分析并简化了无人机模型; 采用信息传递策略, 提出了结合前馈与反馈的控制策略, 前馈信息为长机实时速度; 仿真测试显示, 该策略在响应速度、稳定性和超调量上优于传统 P 控制器和 PID 控制器; 通过构建两架四旋翼无人机系统, 进行了编队飞行实验, 实验结果证实了策略的有效性; 该策略在工程应用中显示出价值和潜力, 为旋翼类多无人机编队控制提供了解决方案。

**关键词:** 速度前馈; 无人机; 编队控制; 四旋翼; 跟踪

## UAV Formation Control Based on Velocity Feedforward

QI Yahui, DI Lingsong, YAN Shi, WU Xiuzhen, SUN Defeng

(Naval Aviation University, Yantai 264001, China)

**Abstract:** The formation control of rotary wing unmanned aerial vehicles (UAVs) is researched, the drone model is analyzed and simplified, an information transmission strategy is proposed the control approach that integrates feedforward and feedback mechanisms, with the feedforward component being the real-time speed of the leading drone. Simulation tests show that the strategy has superior to conventional P and PID controllers in response speed, stability, and overshoot. The multi-drone system of two quadrotor drones is constructed to carry out the formation flight experiments, the results show the effectiveness of the strategy. This strategy has a practical value and potential for engineering applications, providing a viable solution for the swarm control of rotary-wing drones.

**Keywords:** velocity feedforward; UAV; formation control; quadrotor; tracking

### 0 引言

近年来, 随着无人机技术的不断发展, 无人机编队控制成为了一个热门的研究领域<sup>[1]</sup>。无人机编队控制可以将多架无人机组成一个整体, 执行统一的任務, 从而胜任单架无人机无法完成的任務场景, 更加高效和灵活<sup>[2]</sup>。然而, 多无人机的编队控制既涉及不同无人机间的信息传递策略, 又涉及不同信息条件下的具体控制方法, 存在诸多难点, 这些难点抑制了无人机集群控制的推广和应用<sup>[3-10]</sup>。

国防科技大学王祥科团队在大规模固定翼无人机集群编队控制方法有深入的研究, 提出了一种分层分组的控制方案, 通过模拟仿真进行了验证<sup>[11]</sup>。文献 [12] 研究了具有输入约束的固定翼无人机基于距离的编队问题, 提出了一种低增益编队控制器, 实现了在输入约束条件下的多无人机编队, 并通过数值模拟和半实物仿真验证了方法的有效性。文献 [13] 对多无人机构错协同控制进行了总结, 分析了多无人机故障飞行条件下的编队控制策略, 包括领航跟随、近距离编队、基于代数图、虚拟控制等方法。文献 [14] 研究了具有双积分器模型的多无人机编队控制的可扩展性问题, 通过使用分布式无人机编队控制策略来实

现。此外, 文献 [15] 分析了不同多跳广播协议对分布式无人机编队控制有效性的影响。文献 [16] 解决了关于无人机编队保持的开放性问题, 通过提出一种反演 (backstepping) 协同制导控制方法, 以快速形成所需编队并达到无人机稳态, 并通过跟踪虚拟领导者的三架无人机组成的三角形编队进行了验证。文献 [17] 提出了一种基于虚拟目标制导 (VTG, Virtual Target Guidance) 的分布式模型预测控制方案, 用于多个无人机的编队控制, 提出了一种事件触发机制用以减轻无人机编队控制的计算负担, 同时兼顾预测状态误差和代价函数的收敛。文献 [18] 提出了一种新的基于群体智能的分布式模型预测控制方法, 用于多个无人机的协调控制, 设计分布式代价函数并将其集成到每个 FHOCP (Finite Horizon Optimal Control Problem, 有限视界优化控制问题) 中, 实现了多无人机编队控制和禁飞区约束下的轨迹跟踪。

虽然学界对多无人机的编队控制研究逐渐深入, 但是很多算法应用于实践还比较困难, 因为在实际的编队控制中, 不仅要保证控制方法的收敛性, 还需要关注输入信息的可获取性以及实际编队控制器的成本等问题。本文提出了基于速

收稿日期: 2023-12-17; 修回日期: 2024-01-26。

基金项目: 山东省自然科学基金 (ZR2020QF057)。

作者简介: 祁亚辉 (1987-), 男, 博士, 讲师。

吴修振 (1988-), 男, 博士, 副教授。

通讯作者: 狄凌松 (1988-), 男, 硕士。

引用格式: 祁亚辉, 狄凌松, 闫实, 等. 基于速度前馈的无人机编队控制[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(7): 176-180, 188.

度前馈的无人机编队控制方法, 其基本思想是通过编队中无人机组间通信网络, 进行长机飞行状态的传递, 僚机利用长机速度进行速度前馈控制, 再利用长僚机间的位置误差设计反馈项进行动态调整, 以实现编队的精确控制。

### 1 系统结构及原理

无人机编队飞行是指多架无人机在飞行过程中保持固定的相对距离和方位或者按照某一规律运动, 从而形成一种有规律的队形。图 1 示意了 3 架四旋翼无人机保持恒定的三角形队形, 并整体保持一定飞行速度的飞行编队。

无人机编队飞行是实现多架无人机协同飞行的关键技术之一, 其中实时控制和无人机间的信息交互是不可或缺的。尽管目前基于视觉模拟生物群集行为的研究在实现相对定位方面取得了一定的进展, 但其在无人机实际编队中的应用仍然面临极大的挑战。因此, 当前基于实时通信共享飞行状态信息的模式仍然是当前无人机编队实现的主流方法, 这种通信控制构架如图 2 所示。

队形协同是多无人机协同任务中的重要组成部分。从控制角度来看, 要实现编队飞行, 每架无人机都需要配备飞行控制器和任务控制器或者综合二者功能的综合控制器。飞行控制器主要用于保持无人机的稳定飞行, 包括对无人机的位置、速度等参数进行精确控制。任务控制器则基于无人机载荷来实现复杂任务, 包括但不限于目标识别跟踪控制、路径规划、编队控制等。本文主要关注的是编队控制, 即任务控制器如何通过综合相邻或领航无人机的飞行状态, 运行相关算法, 并将相关指令发送给飞行控制器执行, 最终实现队形的形成和保持。同时, 通信模块也是实现编队飞行的重要部分。无人机之间的信息交互主要通过无线通信网络进行, 一般采用组网模块以便于分布式编队控制。综上所述, 无人机编队飞行的实现需要依赖先进的控制技术以及高效的通信机制, 从而确保无人机在协同任务中能够实现精确的队形控制和稳定地飞行。

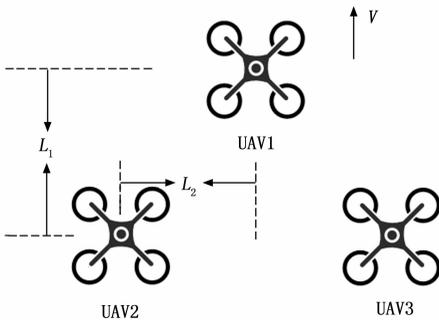


图 1 多无人机飞行编队示意图

### 2 编队控制器设计

#### 2.1 无人机模型分析

无人机通常被视为刚体运动, 其运动状态可以通过六自由度方程进行描述。无论是旋翼无人机<sup>[19]</sup>还是固定翼无人机<sup>[20]</sup>, 它们都具有非线性系统的特性。这意味着其运动行为无法通过简单的线性关系来描述, 需要使用更为复杂的非线性方程来进行建模和分析。其状态方程可以描述如下:

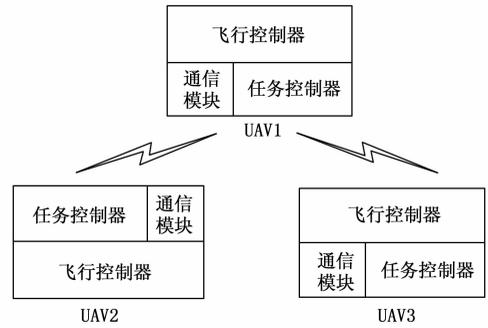


图 2 多无人机控制架构

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

其中:  $\bar{x} = [x, y, z, v_x, v_y, v_z, \varphi, \theta, \psi, \dot{\varphi}, \dot{\theta}, \dot{\psi}]^T$  作为无人机的状态向量, 包含了 6 自由度的动态信息, 包括三维空间中的位置坐标、速度, 以及描述无人机姿态的 3 个欧拉角及其对应的角速度。这些信息共同构成了无人机的完整状态描述。这里各物理量按照东北天导航系和前左上机体体系定义。 $u$  为控制输入向量, 它包含旋翼无人机在 3 个轴向向上的力矩和总升力, 通过对它们的实时调整, 可以实现无人机在空间中的姿态控制、速度控制和位置控制等。

对于这样一个高维非线性方程, 其控制器设计和稳定性分析是一项极具挑战性的任务。然而, 在编队飞行中, 主要关注的是无人机之间的相对位置关系, 而并非每个无人机的具体姿态。此外, 编队飞行通常更注重二维平面上的队形控制, 因此在大多数情况下, 如果无人机高度通道飞行稳定, 我们可以忽略无人机的垂直机动, 只考虑水平运动。在平衡态 (悬停状态) 附近, 旋翼无人机水平运动模型可以简化如式 (2) 所示。

$$\begin{cases} \dot{\bar{x}} = \bar{v}_x = g\theta \\ \dot{\bar{y}} = \bar{v}_y = -g\varphi \end{cases} \tag{2}$$

由于编队飞行对无人机本身航向并无特定要求, 为了便于分析, 直接令航向角  $\psi = 0$ , 即保持不变,  $\theta, \varphi$  定义同式 (1), 为无人机俯仰角和横滚角。

针对以上简化后的无人机模型, 如果能够实现对欧拉角的精确控制, 那么就可以通过使用简单的 PID 控制器<sup>[21]</sup>来实现对无人机位置和速度的良好控制。在实际飞行中, 无人机的欧拉角可以通过航姿系统进行测定, 实现其闭环控制, 从而得到无人机横向加速度。然而, 考虑到无人机机动可能会对航姿测量产生干扰, 以及无人机横向速度势必带来的空气阻力造成的附加加速度, 由式 (2) 等号右侧计算得到的无人机横向加速度会具有较大误差, 将系统简化为二阶积分模型来设计编队控制器可能会因为无法给出准确的执行量而对编队效果产生不利影响。

虽然式 (2) 反映的物理规律在无人机机动、或者飞行速度较大时并不准确, 但是得益于外部速度测量信息, 可以建立内环速度控制实现对无人机速度的精确控制。即使在存在未建模动态的情况下, 无人机仍然能够实现速度的稳定控制, 这在无人机的实际应用中已经得到证实。

编队控制大部分应用于非快速机动状态, 相比于内环

速度控制的短周期运动，编队控制可以认为是长周期运动，忽略频繁机动的情况下，可以将无人机的速度响应近似为一阶惯性系统：

$$v_i = \frac{1}{T_s + 1} v_{is} \quad (3)$$

式中， $v_i$  表示水平两个方向上无人机实时速度， $v_{is}$  表示对应方向上无人机速度给定，下标  $i$  表示编队中的第  $i$  架无人机， $T$  为时间常数。

在单无人机速度可控的情况下，编队中的无人机模型可以表示为一种相对简单的形式：

$$\begin{cases} \dot{x}_i = v_i \\ v_i = \frac{1}{T_s + 1} v_{is} \end{cases} \quad (4)$$

此时， $x_i = [x_i, y_i]^T$ ，表示水平两个方向的位置矢量。

对于式 (4) 的描述是合理的，市场上成熟的商业无人机如大疆无人机，或者开源飞控 Pixhawk 控制的无人机均支持速度给定，简单地比如遥控模式，遥控器杆位可以直接对应为无人机的速度给定，当速度给定后，无人机速度响应准确，满足绝大多数应用要求；那么要无人机移动一定的位置，只需要改变速度即可；但是有一点不容忽视，速度响应肯定有滞后，这也容易理解，速度总是渐变的，这里将滞后过程看作一阶惯性环节，虽然不够严谨，但是在前文提到的非频繁机动前提条件下，具有一定的合理性。

### 2.2 编队控制器设计

为了实现编队控制，采用两级控制器的结构，即外环编队控制器和内环速度控制器。在这种模式下，编队策略采用了长僚机模式。在长僚机模式中，长机可以自由飞行，其飞行速度为  $V_1$ 。僚机在获取长机的速度信息后，采用前馈+反馈的控制方式。在前馈控制中，将长机的速度作为前馈项。这种前馈项的作用是快速响应长机的速度变化，从而实现僚机对长机速度的快速跟随，在理想情况下达到“相对静止”的功能。在反馈控制中，基于编队队形误差构建反馈项。反馈项的作用是对编队中僚机的位置和速度进行修正，以确保僚机能够保持与长机期望的队形。具体的控制算法如式 (5) 所示：

$$v_{is} = v_1 + k(x_1 - x_i) \quad (5)$$

式中， $k$  为正的常数，下标 1 在此处表示长机。

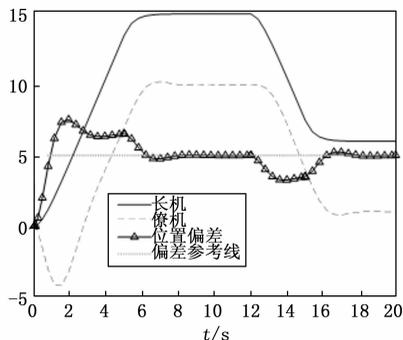
在这里，编队控制器可以被视为一种跟踪控制器，其跟踪目标为长机。该控制器的设计中融入了长机的速度前馈项，这一项的加入等同于引入了待跟踪轨迹的微分项。这种设计能够有效减少跟踪误差，并提高跟踪的快速性。

### 2.3 算法仿真分析

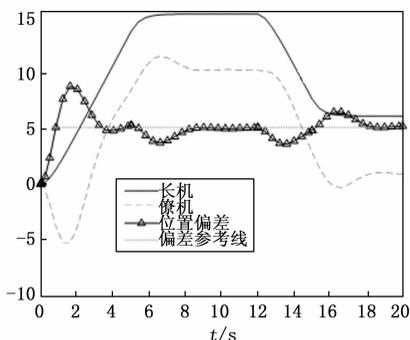
式 (5) 反应的控制器虽然形式简单，但是它反应了多无人机信息共享模式下，进行编队飞行的优化策略，即首先跟踪长机的速度，保证编队内无人机“步调一致”；在此基础上再引入队形误差项，通过增减速度使无人机满足指定队形。

为了深入探究前述模型和控制方法对无人机编队跟踪性能的影响，进行仿真分析。由于无人机在水平方向上的运动是解耦的，因此仅考虑单一的方向。

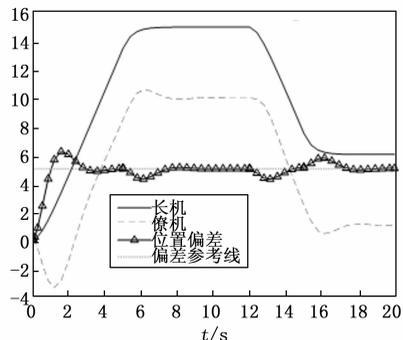
在仿真实验中，设定以下条件：无人机 1 从初始位置开始进行一段预先设定的机动飞行，无人机 2 则跟随无人机 1 的飞行轨迹，理想的队形是保持无人机 1 后方 5 米距离。为了展示本文方法的控制效果，选用传统跟踪控制方法进行对比，分别采用传统的  $P$  控制、PID 控制以及 2.2 节中描述的前馈+反馈控制进行仿真，其中时间常数  $T$  取值为 0.5。通过仿真实验，得到了两架无人机的运动曲线，如图 3 所示。图 3 (a) 为  $P$  控制器下的无人机位置曲线，其中  $P$  的取值为 2；图 3 (b) 为 PID 控制器下的无人机位置曲线，其中  $P$  取值为 2， $I$  为 1， $D$  为 0.1；图 3 (c) 为前馈+反馈控制器下的无人机位置曲线， $k$  取值为 2。图中实线表示无人机 1 位置随时间变化曲线，虚线表示无人机 2 随时间变化曲线，点线是设定的长机与僚机的距离偏差值，带三角实线标识的曲线是实际的距离偏差值。



(a) P控制的双机位置曲线



(b) PID控制的双机位置曲线



(c) 前馈+反馈控制的双机位置曲线

图 3 双机编队位置曲线

从位置跟踪仿真曲线中可以发现，在设定了一个理想的位置偏差值 (5 米) 后， $P$  控制器能够使僚机较好地跟踪

长机位置变化趋势,但是长机有速度时,队形有明显静差,相较于  $P$  控制器, PID 控制器能够消除静差,但在长机启动或停止时跟踪超调量较大,即便引入微分项,超调消除效果也十分有限。采用前馈+反馈控制器,不仅响应速度得到提升,而且在消除静差和减小超调方面均优于  $P$  控制器和 PID 控制器。

可以看出本文提出的前馈+反馈的控制方法在响应速度、控制精度和超调量方面都展现出了显著的优势。这一结果为实际应用中无人机编队的跟踪控制提供了重要的理论支撑。

### 3 系统硬件和软件设计

为了验证前馈+反馈控制策略在实际无人机编队控制中的有效性,进行实飞实验。

#### 3.1 无人机编队系统硬件系统设计

实验使用四旋翼无人机,由团队自己搭建,这些无人机基于开源飞控 Pixhawk 6C<sup>[22]</sup> 进行设计,选用 450 轴距碳纤维机架,适配动力套装,由 4 S 锂电池作为电机动力电源和机载设备电源。采用英伟达的 Jetson NX 作为任务控制器(编队控制),并选用 VPA15A 模块作为通信模块。整个系统的硬件架构如图 4 所示。

整个系统中, Pixhawk 作为内环控制器,通过 4 个电调驱动 4 个电机,实现对无人机的姿态稳定控制以及速度闭环控制; Jetson NX 作为编队控制器,实现编队中不同无人机间信息的收发处理和编队控制运算。

VPA15A 通信模块是一款星型自组网通信模块,工作于 1.4 G 频段,抗干扰强,同时支持多种传输带宽分配,接口丰富,包括网口, RS232 串口, TTL 串口等,通过该模块,可实现长机飞行状态向僚机的实时传输。

#### 3.2 双无人机编队软件系统设计

ROS (Robot Operating System) 在无人机领域的应用已经越来越广泛<sup>[23]</sup>。ROS 是一个开放源代码的机器人操作系统,提供了各种库和工具,可以帮助开发人员快速构建复杂的机器人应用程序。在无人机领域,ROS 可以用于实现各种任务,如自主导航、目标跟踪、避障等。具体来说,ROS 可以提供各种传感器驱动程序和算法库,使得无人机可以感知周围环境,并根据任务需求做出相应的决策。此外,ROS 还支持多无人机协同工作,可以实现编队飞行、协同搜索等任务。由于 ROS 的分布式架构具有出色的通信和协作能力,使得多架无人机之间的协同工作变得简单高效。因此,在本项编队验证实验中,我们选择基于 ROS 平台进行验证。通过 ROS 平台提供的各种库和工具,我们可以快速构建复杂的无人机编队应用程序,并实现多架无人机之间的协同控制和通信。这种基于 ROS 平台的验证方法不仅可以提高实验效率,还可以保证实验结果的准确性和可靠性。

在编队控制软件中,基于 Jetson NX 平台(安装有 Ubuntu 18.04 操作系统)上运行的 ROS 来部署控制算法。该软件是在图 4 所示的硬件配置下进行的,包括两架无人机(UAV1 和 UAV2)以及一个地面站,它们都处于 ROS 组网模式。其中,UAV1 的软件主要负责实现基于任务的

自主飞行。而 UAV2 的软件则主要基于第 2 节所述的方法来实现编队跟随,并扮演“忠诚僚机”的角色。软件设计上,UAV1 根据任务程序发布的指令进行飞行,并将自己的位置和速度信息周期性发布,这里任务程序不涉及本文编队控制,不再赘述;下面主要对 UAV2 的软件设计进行阐述。UAV2 的软件流程图如图 5 所示。在初始化阶段,UAV2 订阅自身的位置、速度信息以及 UAV1 的位置信息,并读取队形参数。在 UAV2 的主程序中,主要根据之前的前馈+反馈控制算法计算出期望速度值,然后根据 Mavros 协议(Pixhawk 与外部计算机通信的 ROS 功能包)发布速度给定话题。UAV1 位置读取、UAV1 速度读取和 UAV2 位置读取程序通过回调函数实现,保证相应变量的实时更新。同时运行的 Mavros 程序接收速度给定话题解析后通过串口将命令发送给机载飞控 PX4 执行,最终使其与 UAV1 保持预定队形。

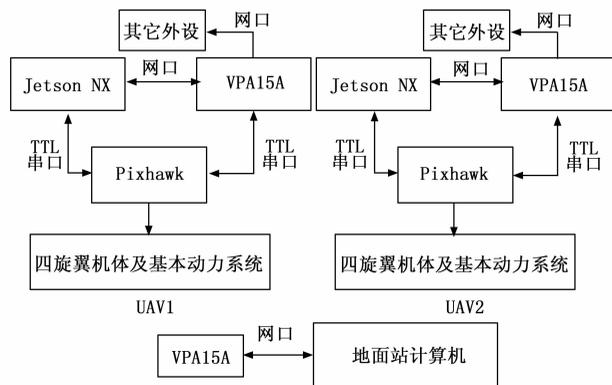


图 4 双机编队硬件系统框图

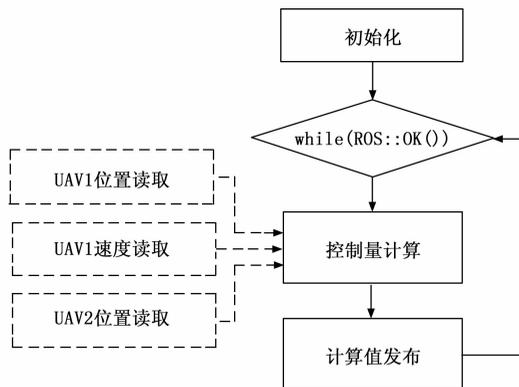


图 5 UAV2 (跟踪无人机) 软件流程图

## 4 实验结果与分析

### 4.1 实验步骤和方法

因为本文方法主要适用于编队中的跟踪控制,对长机的运动没有要求,为了方便实验且兼具普适性,长机由人操控在安全范围内进行往复运动,僚机完全自主控制,保持队形。实验中,两架无人机通过普通 GPS 定位,长机高度在设定为 6 m,人操控时尽量保证高度通道稳定,僚机高度控制保持在 10 m,以防碰撞。飞行共计进行 7 分余钟,通过观察飞行实效和分析两架无人机的轨迹来评判编队效果。

### 4.2 实验结果及分析

图 6 所示为双无人机编队的实飞效果截图，其中包含 6 幅子图，从左到右、从上到下地展示了无人机的动态过程。相对于视频拍摄者，这个动态过程可以被简单描述为：无人机首先由左向右运动，然后从远处向近处运动。通过对比背景中天空云朵的相对位置，可以清晰地观察到这一过程。这些子图动态地描绘了无人机在空中飞行的位置变化以及队形保持情况。

图 7 描绘了两架无人机的飞行轨迹。其中，实线代表长机，由操控员进行手动遥控；虚线则为僚机，采用全自主控制。从图中可以明显看出，两架无人机的位置信息在减去队形偏差后，虽然速度限制在 6 m/s 以下，但整个飞行过程却处于不规则的机动状态。在这种机动状态下，僚机对长机的跟踪效果显著，尽管存在一定的误差，但总体上编队飞行效果非常明显。

为了更直观地观察跟踪效果，对两架无人机在东向的位置进行了同步对比，这里无人机位置已经减去队形偏差。如图 8 所示，实线表示长机东向位置轨迹，虚线则为僚机东向位置轨迹。从图中可以看出，整体上僚机能够较好地跟踪长机，但也存在明显的行为滞后。点划线是两机减去队形距离后的位置偏差，可以看出该位置偏差在 0 上下波动，当长机进行明显机动时，如急停后反向飞行，僚机的行为表现出一定的“超调”，但超调误差不超过 3.5 m，在运动相对平稳后误差会快速收敛至 0 附近。



图 6 无人机实飞视频截图

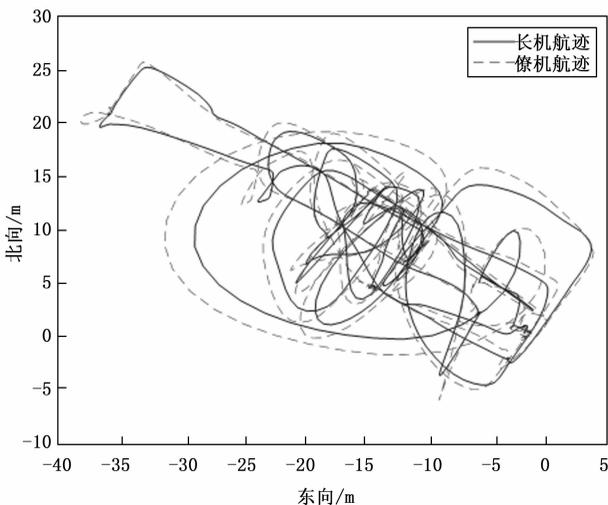


图 7 双无人机飞行轨迹曲线

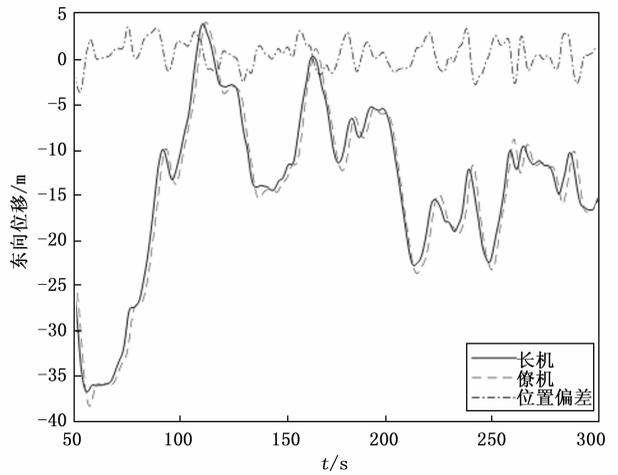


图 8 双无人机飞行东向位置—时间曲线

使无人机实现较好的编队飞行效果，虽然实际飞行实验只使用了两架无人机，但是本方法很容易推广至多僚机情况。

### 5 结束语

本文对当前无人机编队控制的发展进行了总结，深入探讨了基于速度前馈的无人机编队控制，通过分析，合理简化了旋翼类无人机运动模型，在此基础上，利用长机速度信息作为前馈项，利用长僚机队形偏差作为反馈输入项，设计前馈+反馈控制器，采用长僚机策略，实现无人机编队。仿真实验显示了本文方法相比传统 P 控制器、PID 控制器的优越性。在仿真实验基础上，进行了包含两架四旋翼无人机的实际飞行实验，结果表明该方法的实际适用性。本文的研究结果为无人机编队控制提供了思路和方法，为未来的无人机编队应用提供了有价值的参考。

然而，本文的研究也具有一定的局限性。主要表现在控制策略涉及到的无人机数量较少，在更多数量无人机编队控制上的有效性有待进一步验证；另外，采用的无人机是项目组自己搭建的轴距 450 的四旋翼无人机，对于其他型号的无人机效果如何有待商榷，参数的选择对控制精度的影响以及系统稳定性的影响还有待进一步深入研究。

下一步，将增加无人机数量，同时在无人机飞行过程中对队形进行动态调整，包括无人机随机加入集群、无人机随机从集群中退出、长机随机性机动、队形随机调整等，验证控制方法的有效性与稳定性。

#### 参考文献：

[1] 吴杰宏, 李丹阳. 无人机集群编队控制方法研究综述 [J]. 无线电通信技术, 2023, 49 (4): 589-596.  
 [2] 牛铁峰, 肖湘江, 柯冠岩. 无人机集群作战概念及关键技术分析 [J]. 国防科技, 2013 (5): 589-596.  
 [3] 王祥科, 刘志宏, 丛一睿, 等. 小型固定翼无人机集群综述和未来发展 [J]. 航空学报, 2020, 41 (4): 20-45.  
 [4] 钮伟. 无人机蜂群对海作战概念与关键技术研究 [J]. 指挥控制与仿真, 2018 (1): 20-27.

实飞实验表明本文提出的前馈+反馈的控制方法能够

(下转第 188 页)