

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2021.01.014

# 集群空间控制框架下的四旋翼编队飞行研究

戴邵武, 赵超轮, 赵国荣, 刘伯彦, 罗鑫辉

(海军航空大学岸防兵学院, 烟台 264001)

**摘要:**针对四旋翼编队控制问题,采用水平通道与高度通道解耦的四旋翼动力学模型,基于集群空间控制方法设计了编队控制器。首先介绍了集群空间控制方法的两个重要概念,即集群空间变量和集群运动学关系,进而以3架四旋翼为例,详细地给出了集群空间编队控制器的设计思路。在选取集群变量并建立编队与单机的运动学关系后,设计了不完全微分PD控制器以产生集群控制指令。不完全微分PD控制与常规PD控制相比,前者抗高频干扰能力更强。最后通过仿真验证了该编队控制算法能够完成多架四旋翼的队形放大和队形保持任务,且具有较高的控制精度和较好的抗高频干扰能力。

**关键词:**四旋翼; 集群空间; 编队控制; 不完全微分; PD控制

中图分类号: V249; V279 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号: 2095-8110(2021)01-0125-08



## Formation Control for a Multi-quadrotor System under the Cluster Space Control Framework

DAI Shao-wu, ZHAO Chao-lun, ZHAO Guo-rong, LIU Bo-yan, LUO Xin-hui

(Coastal Defense Academy, Naval Aviation University, Yantai 264001, China)

**Abstract:** For the multi-quadrotor formation control, this paper adopts the horizontal channel and height channel decoupled quadrotor dynamic model and designs the formation controller based on the cluster space control method. Firstly, two important concepts of the cluster space control method are introduced, namely cluster space variable and cluster kinematics relationship. Then three quadrotors are taken as examples to give a detailed design idea of cluster space formation controller. After selecting the cluster variables and establishing the kinematic relationship between formation and single drone, an incomplete differential PD controller is designed to generate the cluster control instructions. The incomplete differential PD control is more resistant to high frequency interference than the conventional PD control. Finally, the simulation results show that the proposed formation control algorithm can complete the multi-quadrotor formation amplification and formation maintenance tasks, and has high control precision and good anti-high-frequency interference capability.

**Key words:** Quadrotor; Cluster space; Formation control; Incomplete differential; PD control

收稿日期: 2019-09-18; 修订日期: 2019-12-06

基金项目: 国家自然科学基金(61473306, 61903374)

作者简介: 戴邵武(1966-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事飞行器综合导航方面的研究。E-mail: 792936421@qq.com

## 0 引言

近年来,无人机行业发展迅速,在军用和民用领域得到了广泛应用。单架无人机由于固有的局限性,无法完成复杂的任务,人们便希望通过多无人机间的协调、合作,以产生整体大于部分之和的效果。其中,编队控制问题是多无人机系统协同合作的基础和难点,也是研究的热点。根据信息交互控制策略的不同,多无人机协同控制方式主要分为集中式控制和分布式控制<sup>[1-2]</sup>。其中,集中式控制策略要求编队中至少有1架无人机能够获取其他所有无人机的状态信息,通过集中运算得到每架无人机的控制指令并发送给其他无人机,该策略控制精度高且易于实现,但编队规模受限;分布式控制策略则仅需要获取相邻几架无人机的状态信息便可实现编队,适用于大规模编队,但全局性不强。在具体编队控制方法方面,目前主流的方法有领航跟随法<sup>[3]</sup>、虚拟结构法<sup>[4]</sup>、基于行为法、人工势场法以及基于一致性理论的方法<sup>[5]</sup>。以上编队控制方法各有优劣,适用于不同的任务需求,也常组合使用以达到期望的编队控制效果<sup>[6]</sup>。本文采用的集群空间控制方法(Cluster Space Control Method)并非主流控制方法,是由美国圣塔克拉拉大学机器人系统实验室提出的一种适用于多移动机器人编队控制的理论<sup>[7]</sup>。该方法的突出优势是编队参考点的位置可任意配置,允许编队结构全自由度变化,控制精度较高。该方法目前已成功应用于无人车<sup>[8]</sup>和飞艇<sup>[9]</sup>等多智能体编队控制中,但将该方法应用到四旋翼上的研究文献很少,国内则几乎没有关于集群空间控制的文献。

四旋翼无人机因可垂直起降、定点悬停、机动灵活等优势,近年来备受关注,应用前景广阔。由于将集群空间控制方法应用到四旋翼上的研究还不深入,可供参考的文献很少,且考虑到对于无人机编队控制问题,通常先以实现二维平面编队作为基础<sup>[10]</sup>,一般选用2~4架无人机来验证所设计控制算法的有效性<sup>[11-12]</sup>。因此,本文研究了二维平面上的四旋翼编队控制问题,并以3架无人机为例说明算法的有效性。文献[8]应用集群空间控制方法,设置平面编队的参考原点位置位于3个机器人的中心,而本文将编队参考原点位置与其中1架无人机位置重合,使编队结构更为简单,以减少运算量。

对于单机控制,基于四旋翼动力学模型,采用

内外环结构和经典串级PID控制实现位姿控制;对于编队控制,采用集中控制策略,在集群空间控制框架下建立编队整体与单机的运动学关系,集群控制指令由不完全微分PD控制器产生,相较常规PD控制,其抗高频干扰能力较强。

## 1 集群空间控制方法

集群空间控制是一种能够指定、控制、监控多移动机器人编队的理论<sup>[7]</sup>。集群空间控制的本质是将 $n$ 个机器人系统视为一个实体,或称作为一个集群,并用位置量、方位量、与编队形状相关的量等来表示集群属性。在设计编队控制器前,需先定义两组状态变量,分别为集群变量和单机变量。前者是基于集群属性选择的一组适合指定、控制、监控编队状态的变量;后者是基于机器人单机属性选择的一组状态变量。然后通过运动学转换建立集群变量与单机变量的联系。

### 1.1 集群空间变量

考虑由 $n$ 个机器人组成的系统,假设每个机器人具有 $m$ 个自由度,其中平移自由度为 $p$ ,旋转自由度为 $r$ ,即 $m=p+r$ 。则 $n$ -机器人系统中所有单机相对于惯性坐标系的位置及旋转角度可由 $nm$ 个变量来完整表示。换言之,完整描述 $n$ -机器人系统的状态至少需要 $nm$ 个变量。假设 $n$ 个机体坐标系分别由 $o_{bi}x_{bi}y_{bi}z_{bi}$ , $i=1,2,\dots,n$ 表示,惯性坐标系由 $o_d x_d y_d z_d$ 表示,编队坐标系由 $o_c x_c y_c z_c$ 表示。

对于六自由度 $n$ -机器人系统,机体坐标系相对惯性坐标系的状态可由 $(x_i, y_i, z_i, \phi_i, \theta_i, \psi_i)$ 表示,编队坐标系相对惯性坐标系的状态可由 $(x_c, y_c, z_c, \phi_c, \theta_c, \psi_c)$ 表示,其中 $x, y, z$ 表示三维位置, $\phi, \theta, \psi$ 表示3个姿态角。通过上述分析可知,要完整表示六自由度 $n$ -机器人系统的编队状态,至少需要 $6n$ 个变量,本文将描述编队状态的变量称为集群变量,并用 $c_i, i=1,2,\dots,6n$ 表示,集群变量与 $(x_i, y_i, z_i, \phi_i, \theta_i, \psi_i)$ 和 $(x_c, y_c, z_c, \phi_c, \theta_c, \psi_c)$ 存在一定的函数关系,即

$$\begin{aligned} c_1 &= f_1(x_c, y_c, z_c, \phi_c, \theta_c, \psi_c, x_1, y_1, z_1, \phi_1, \\ &\quad \theta_1, \psi_1, \dots, x_n, y_n, z_n, \phi_n, \theta_n, \psi_n) \\ c_2 &= f_2(x_c, y_c, z_c, \phi_c, \theta_c, \psi_c, x_1, y_1, z_1, \phi_1, \\ &\quad \theta_1, \psi_1, \dots, x_n, y_n, z_n, \phi_n, \theta_n, \psi_n) \\ &\vdots \\ c_{6n} &= f_{6n}(x_c, y_c, z_c, \phi_c, \theta_c, \psi_c, x_1, y_1, z_1, \phi_1, \\ &\quad \theta_1, \psi_1, \dots, x_n, y_n, z_n, \phi_n, \theta_n, \psi_n) \end{aligned} \quad (1)$$

集群变量的选取根据不同任务需求会有差异,一般包括编队位置、编队方位、单机与编队的相对方位、编队形状 4 个方面。编队位置用于表示编队相对惯性系的位置,在单机自由度均相同的前提下,编队位置量的数量可用  $p$  表示;编队方位用于表示编队坐标系相对惯性坐标系的方位关系,编队方位量的数量可用  $o$  表示,当  $n \geq p=3$  时,则  $o=3$ ,否则,  $o=p-1$ ;单机与编队的相对方位量表示每个单机相对编队系的方位,用  $nr$  个变量便可构成;编队形状用于描述编队的几何关系,编队形状量的数量用  $s$  表示,假设共有  $nm$  个集群变量来描述编队的状态,则  $s=nm-p-o-nr=(n-1)p-o$ 。一般从以上 4 个方面选取集群变量,便能够清晰、直观、全面地刻画编队的状态。

## 1.2 集群运动学关系

因为编队控制的指令最终要发送给每个单机去执行,所以需要建立集群变量与单机变量的运动学关系。

### (1) 位置运动学

定义集群变量构成的向量为  $\mathbf{C}$ ,所有单机变量构成的向量为  $\mathbf{R}$ ,并分别称为集群位置向量和单机位置向量。两者均为  $nm$  维列向量,两者关系如下

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_{nm} \end{pmatrix} = \text{KIN}(\mathbf{R}) = \begin{pmatrix} g_1(r_1, r_2, \dots, r_{nm}) \\ g_2(r_1, r_2, \dots, r_{nm}) \\ \vdots \\ g_{nm}(r_1, r_2, \dots, r_{nm}) \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \vdots \\ r_{nm} \end{pmatrix} = \text{INVKIN}(\mathbf{C}) = \begin{pmatrix} h_1(c_1, c_2, \dots, c_{nm}) \\ h_2(c_1, c_2, \dots, c_{nm}) \\ \vdots \\ h_{nm}(c_1, c_2, \dots, c_{nm}) \end{pmatrix} \quad (3)$$

称式(2)为正向位置运动学关系式,式(3)为逆向位置运动学关系式,以此建立集群变量与单机变量的联系。

### (2) 速度运动学

对向量  $\mathbf{C}$  和  $\mathbf{R}$  分别求导可得  $\dot{\mathbf{C}}$  和  $\dot{\mathbf{R}}$ ,称为集群速度向量和单机速度向量。通过雅克比矩阵  $\mathbf{J}(\mathbf{R})$  可以建立  $\dot{\mathbf{C}}$  和  $\dot{\mathbf{R}}$  之间的联系,即

$$\dot{\mathbf{C}} = \mathbf{J}(\mathbf{R})\dot{\mathbf{R}} \quad (4)$$

其中

$$\mathbf{J}(\mathbf{R}) = \begin{pmatrix} \frac{\partial c_1}{\partial r_1} & \frac{\partial c_1}{\partial r_2} & \dots & \frac{\partial c_1}{\partial r_{nm}} \\ \frac{\partial c_2}{\partial r_1} & \frac{\partial c_2}{\partial r_2} & \dots & \frac{\partial c_2}{\partial r_{nm}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial c_{nm}}{\partial r_1} & \frac{\partial c_{nm}}{\partial r_2} & \dots & \frac{\partial c_{nm}}{\partial r_{nm}} \end{pmatrix} \quad (5)$$

式(4)实现了从单机速度向量到集群速度向量的映射。反过来,有

$$\dot{\mathbf{R}} = \mathbf{J}^{-1}(\mathbf{C})\dot{\mathbf{C}} \quad (6)$$

其中,  $\mathbf{J}^{-1}(\mathbf{C})$  为逆雅克比矩阵,为

$$\mathbf{J}^{-1}(\mathbf{C}) = \begin{pmatrix} \frac{\partial r_1}{\partial c_1} & \frac{\partial r_1}{\partial c_2} & \dots & \frac{\partial r_1}{\partial c_{nm}} \\ \frac{\partial r_2}{\partial c_1} & \frac{\partial r_2}{\partial c_2} & \dots & \frac{\partial r_2}{\partial c_{nm}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial r_{nm}}{\partial c_1} & \frac{\partial r_{nm}}{\partial c_2} & \dots & \frac{\partial r_{nm}}{\partial c_{nm}} \end{pmatrix} \quad (7)$$

可见,随着单机数量和自由度的增加,集群变量会相应增加,运动学关系式会变得相对复杂,必然导致机间交互的信息量增大。故文献[7]中提到,在现有技术程度上,若采用集中控制策略,在该控制方法下编队机器人的数量规模大约在 10 个以内。

## 2 四旋翼编队控制系统设计

首先建立四旋翼单机模型,然后进行编队控制器设计。

### 2.1 四旋翼模型

本文采用十字形四旋翼,如图 1 所示。四旋翼是一个非线性、多变量、高度耦合、欠驱动系统<sup>[13]</sup>。假设四旋翼是刚体结构,机体几何对称、质量对称,且几何中心与重心重合。

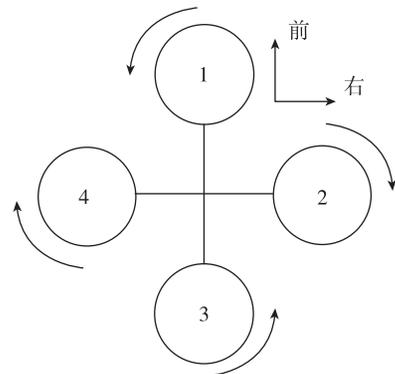


图 1 十字形四旋翼

Fig. 1 Cross-shaped quadrotor

首先建立两个右手坐标系,即惯性北-东-地坐标系及机体坐标系,如图2所示。其中,惯性坐标系 $o_d x_d y_d z_d$ 以地面任意一点为坐标原点, $o_d x_d$ 轴指向北, $o_d z_d$ 轴垂直地面向下;机体坐标系 $o_b x_b y_b z_b$ 与四旋翼机体固连,以机体重心位置为坐标原点, $o_b x_b$ 轴指向机头方向, $o_b z_b$ 轴在机体对称平面内,垂直于 $o_b x_b$ 轴向下。

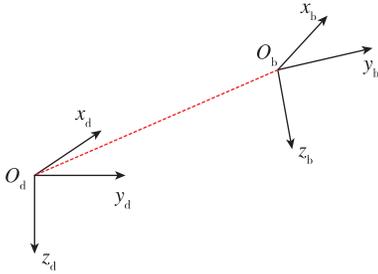


图2 惯性坐标系与机体坐标系

Fig. 2 Inertial and body coordinate system

用 $p = [x, y, z]^T$ 表示无人机相对惯性坐标系的位置变量; $v = [v_x, v_y, v_z]^T$ 表示无人机相对惯性坐标系的速度变量; $\Theta = [\phi, \theta, \psi]^T$ 表示无人机相对惯性坐标系的姿态变量; $\omega = [\omega_x, \omega_y, \omega_z]^T$ 表示无人机相对机体坐标系的旋转角速度。此外,从机体坐标系到惯性坐标系的旋转矩阵 $R_b^d$ 表示为

$$R_b^d = \begin{bmatrix} c\theta c\psi & c\psi s\theta s\phi - s\psi c\phi & c\psi s\theta c\phi + s\psi s\phi \\ c\theta s\psi & s\psi s\theta s\phi + c\psi c\phi & s\psi s\theta c\phi - c\psi s\phi \\ -s\theta & s\phi c\theta & c\phi c\theta \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中, $c\theta$ 、 $s\theta$ 分别表示 $\cos\theta$ 、 $\sin\theta$ ,此规则同样适用于 $\psi$ 、 $\phi$ 。

假设四旋翼在飞行过程中,俯仰角和滚转角都很小,总拉力约等于四旋翼的重力,则有下列近似: $\sin\phi \approx \phi$ , $\cos\phi \approx 1$ , $\sin\theta \approx \theta$ , $\cos\theta \approx 1$ , $f \approx m_0 g$ 。在忽略陀螺效应、 $-\omega \times (J \cdot \omega)$ 项及空气阻力的情况下,采用牛顿-欧拉法可以得到水平通道与高度通道相互解耦的四旋翼动力学模型<sup>[14]</sup>为

$$\begin{cases} \dot{p} = v \\ \dot{v} = g e_3 - \frac{f}{m_0} R_b^d e_3 \\ \dot{\Theta} = \omega \\ \dot{\omega} = \frac{1}{J} \tau \end{cases} \quad (9)$$

其中, $m_0$ 表示无人机质量; $g$ 表示重力加速度; $f$ 为螺旋桨转动产生的拉力; $e_3 = [0, 0, 1]^T$ ; $J = \text{diag}(J_x, J_y, J_z)$ 为相对机体坐标系的转动惯量矩

阵; $\tau$ 为作用于四旋翼上的气动力矩,包括俯仰力矩、滚转力矩和偏航力矩。

四旋翼飞行器控制采用内外环结构,内环控制姿态,外环控制位置,内外环均使用经典串级PID控制<sup>[14]</sup>。

## 2.2 编队控制器

本文以3架四旋翼无人机为例,设计了相应的集群控制算法,实现了二维平面内的编队控制。图3所示为相关的参考直角坐标系,分别为惯性坐标系 $o_d x_d y_d$ 、编队坐标系 $o_c x_c y_c$ 、机体坐标系 $o_{bi} x_{bi} y_{bi}$ , $i = 1, 2, 3$ 。后文中将机体坐标系简记为 $o_i x_i y_i$ 。受领航跟随法启发,编队坐标系是以无人机1的中心位置为坐标原点,无人机2到无人机1中心位置连接线的延长线为 $o_c x_c$ 轴,其垂线为 $o_c y_c$ 轴;机体坐标系以无人机机体中心为坐标原点,机头方向为 $o_i x_i$ 轴,其垂线为 $o_i y_i$ 轴。3架无人机的几何关系如图4所示。

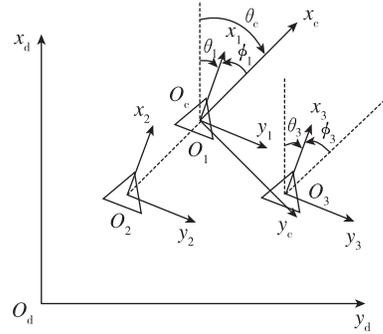


图3 平面3架无人机的参考坐标系

Fig. 3 Reference frames for three UAVs on the plan

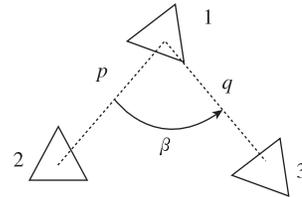


图4 3架无人机的几何关系

Fig. 4 Geometric relation of three UAVs

基于上述坐标系,为描述编队及单机属性,按照1.1节所述规则,首先选择一组集群变量 $C$ 和一组单机变量 $R$

$$C = (x_c, y_c, \theta_c, \phi_1, \phi_2, \phi_3, p, q, \beta)^T \quad (10)$$

$$R = (x_1, y_1, \theta_1, x_2, y_2, \theta_2, x_3, y_3, \theta_3)^T \quad (11)$$

其中, $(x_c, y_c)$ 为编队参考点在惯性系下的二

维位置,由于编队参考点与无人机 1 重合,无人机 1 相当于编队的领航者。 $(x_i, y_i)$  为无人机  $i$  在惯性系下的二维位置坐标,定义无人机  $i$  相对惯性系的偏航角  $\theta_i$  为  $o_d x_d$  轴到  $o_i x_i$  轴的夹角;定义编队基准角  $\theta_c$  为  $o_d x_d$  轴到  $o_c x_c$  轴的夹角;无人机  $i$  相对编队坐标系的偏航角  $\phi_i$  为  $o_c x_c$  轴到  $o_i x_i$  轴的夹角;无人机 1 到 2 的距离为  $p$ ,无人机 1 到 3 的距离为  $q$ ;以无人机 1 为三角形顶点的角为  $\beta$ 。

3 架无人机的通信拓扑图如图 5 所示。无人机 2 和 3 将自身状态信息发送给无人机 1,无人机 1 对获取的所有无人机的信息进行集中处理,解算得到各无人机的控制指令后,再发送给其他无人机。

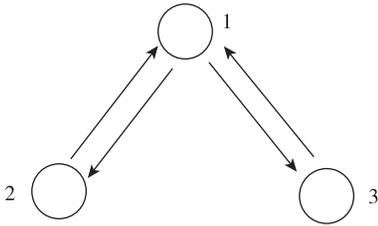


图 5 3 架无人机的通信拓扑图

Fig. 5 Communication topology of three UAVs

基于上述选择的集群和单机状态变量,下面给出了编队系统的正向及逆向位置运动学关系式。正向位置运动学方程为  $C = \text{KIN}(R)$ , 展开为式 (12)

$$\begin{cases} x_c = x_1 \\ y_c = y_1 \\ \theta_c = \arctan \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \\ \phi_1 = \theta_1 - \theta_c \\ \phi_2 = \theta_2 - \theta_c \\ \phi_3 = \theta_3 - \theta_c \\ p = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \\ q = \sqrt{(x_1 - x_3)^2 + (y_1 - y_3)^2} \\ \beta = -\arccos \frac{p^2 + q^2 - \sqrt{(x_2 - x_3)^2 + (y_2 - y_3)^2}}{2pq} \end{cases} \quad (12)$$

逆向位置运动学方程为  $R = \text{INKIN}(C)$ , 展开为式 (13)

$$\begin{cases} x_1 = x_c \\ y_1 = y_c \\ \theta_1 = \phi_1 + \theta_c \\ x_2 = x_c - p \cos \theta_c \\ y_2 = y_c - p \sin \theta_c \\ \theta_2 = \phi_2 + \theta_c \\ x_3 = x_c - q \cos(\beta + \theta_c) \\ y_3 = y_c - q \sin(\beta + \theta_c) \\ \theta_3 = \phi_3 + \theta_c \end{cases} \quad (13)$$

通过对逆向位置运动学方程求偏导数可得逆向速度运动学方程,通过逆雅克比矩阵  $J^{-1}(C)$  可将集群速度变量转换为单机速度变量,即  $\dot{R} = J^{-1}(C)\dot{C}$ , 展开为式 (14)

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{y}_1 \\ \dot{\theta}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{y}_2 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{y}_3 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & p \sin \theta_c & 0 & 0 & 0 & -\cos \theta_c & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -p \cos \theta_c & 0 & 0 & 0 & -\sin \theta_c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & q \sin(\beta + \theta_c) & 0 & 0 & 0 & 0 & -\cos(\beta + \theta_c) & q \sin(\beta + \theta_c) \\ 0 & 1 & -q \cos(\beta + \theta_c) & 0 & 0 & 0 & 0 & -\sin(\beta + \theta_c) & -q \cos(\beta + \theta_c) \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{y}_c \\ \dot{\theta}_c \\ \dot{\phi}_1 \\ \dot{\phi}_2 \\ \dot{\phi}_3 \\ \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{\beta} \end{bmatrix} \quad (14)$$

基于集群空间编队控制策略,给定无人机初始状态  $R_{i\_initial}$  及期望编队状态  $C_{des}$ ,设计编队控制器以产生集群控制指令  $\dot{C}_{cmd}$ 。然后通过逆雅克比矩阵

$J^{-1}(C)$  解算产生单机控制指令  $\dot{R}_{i\_cmd}$ ,具有自身闭环速度控制能力的单机输出实际单机状态  $R_i$ 。通过正向位置运动学运算产生实际的编队状态  $C$  后,

将期望的编队状态  $C_{des}$  与实际的编队状态  $C$  进行比较产生偏差作为编队控制器的输入, 最终构成闭环系统, 实现 3 架无人机的编队控制。文中采用的编队控制框图如图 6 所示。

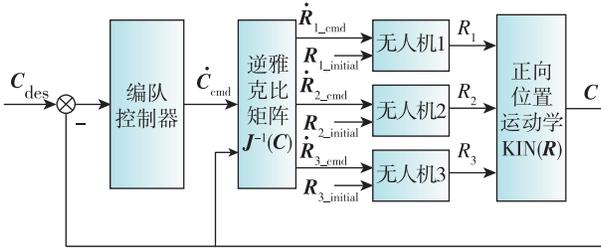


图 6 编队控制框图

Fig. 6 Formation control architecture

出于简化的目的, 同时考虑四旋翼特点, 可设定在飞行过程中, 无人机单机期望偏航角始终为恒定值, 由单机控制器直接实现自身偏航角控制。因此, 集群变量由 9 个简化为 6 个, 即  $C = (x_c, y_c, \theta_c, p, q, \beta)^T$ 。相应的单机变量简化为  $R = (x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3)^T$ 。

考虑到无人机在飞行过程中存在随机扰动, 而常规 PD 控制中的微分项易引进高频干扰, 使控制指令出现突跳, 对控制系统不利。若在控制器中加入低通滤波器, 则可明显抑制高频干扰。因此, 编队控制器采用不完全微分 PD 控制器<sup>[15]</sup>, 控制器结构如图 7 所示。

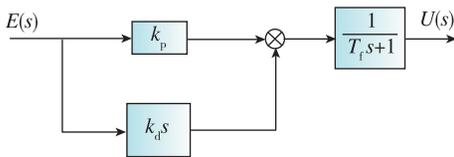


图 7 不完全微分 PD 控制器

Fig. 7 Incomplete differential PD controller

最终, 集群变量误差值通过编队控制器和运动学转换得到单机控制指令, 进而发送给单机控制器, 作为单机  $x$ 、 $y$  通道的速度指令。

### 3 仿真分析

利用 MATLAB 对 3 架四旋翼无人机的编队控制算法进行仿真, 验证其编队控制的性能。编队控制器参数如表 1 所示。

表 1 不完全微分 PD 控制器参数

Tab. 1 Parameters of incomplete differential PD controller

集群变量	$k_p$	$k_d$	$T_f$
$x_c$	1	0.5	0.5
$y_c$	1	0.5	0.5
$\theta_c$	0.8	0.2	0.5
$p$	0.8	0.2	0.2
$q$	0.8	0.2	0.2
$\beta$	0.8	0.2	0.2

假设 3 架无人机均在 5m 高度悬停, 无人机 1、2、3 的初始二维位置分别为 (5, 5)、(3, 3)、(3, 7), 期望的编队状态为

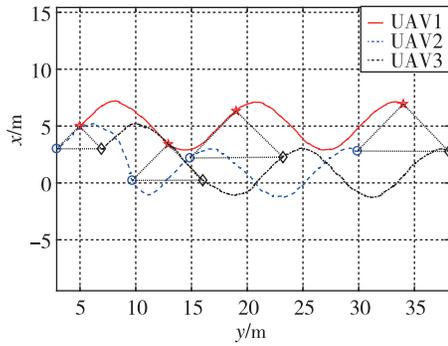
$$x_{cd} = 2\sin(0.5t) + 5, y_{cd} = t + 5, \theta_{cd} = \pi/4$$

$$\beta_d = -\pi/2, p_d = q_d = \begin{cases} 2\sqrt{2}, & 0 \leq t < 5 \\ 2\sqrt{2} - 3 + 0.6t, & 5 \leq t < 10 \\ 3 + 2\sqrt{2}, & t \geq 10 \end{cases}$$

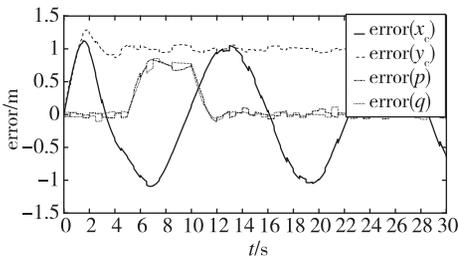
在 3 架无人机的实际位置输出端分别加入幅值为 0.05、0.1、0.1, 采样时间均为 0.5s 的随机干扰, 仿真时间 30s, 仿真步长 0.02s。图 8(a) 为编队飞行的二维轨迹, 其中在 0s、9s、15s、30s 时刻对无人机的位置做了标记, 无人机 1、2、3 分别用五角星、圆形和菱形表示。可见在飞行过程中, 3 架无人机能够形成稳定的三角形编队, 且相对位置唯一确定, 能够较好地实现队形放大和队形保持任务。

由图 8(b) 可见, 领航者无人机 1 的  $y$  方向跟踪误差控制在 1.3m 以内,  $x$  方向跟踪误差在 1.1m 以内, 此位置误差实质与单机控制器有关; 在队形放大过程中, 距离量  $p$ 、 $q$  的误差在 0.9m 以内; 在队形保持过程中, 距离量  $p$ 、 $q$  的误差小于 0.12m, 队形保持效果较好。图 8(c) 中, 角度  $\theta_c$  的误差小于 0.015rad,  $\beta$  的误差小于 0.04rad。图 8(d) 中,  $v_{xc}$  和  $v_{yc}$  表示发送给无人机的速度指令, 数字 1、2、3 对应无人机编号, 在 5s 时进行队形放大, 可见速度指令进行了合理调整, 在有随机信号的干扰下, 指令曲线较为平滑。

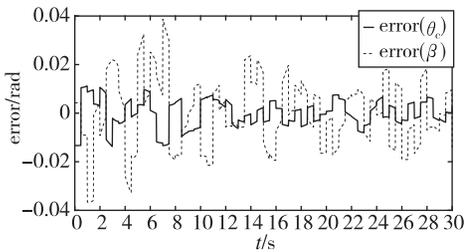
图 9 所示为在常规 PD 编队控制下生成的速度指令曲线, 与图 8(d) 对比易见, 引入不完全微分能够明显抑制随机扰动对系统带来的影响。



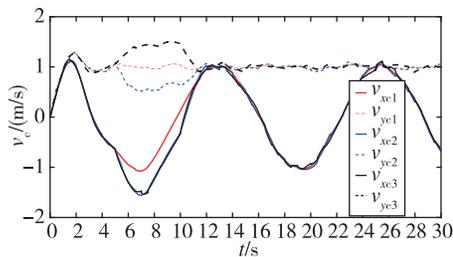
(a) 编队飞行轨迹



(b) 位置、距离误差曲线



(c) 角度误差曲线



(d) 3架无人机的速度指令

图 8 不完全微分 PD 编队控制仿真图

Fig. 8 Incomplete differential PD formation control simulation diagram

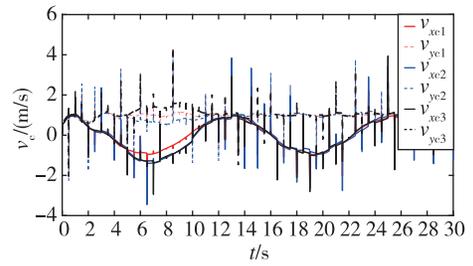


图 9 常规 PD 编队控制下的速度指令

Fig. 9 Velocity commands of conventional PD formation control

#### 4 结束语

本文主要介绍了集群空间控制方法的概念,然后将该方法应用到四旋翼编队控制中,并以 3 架四旋翼为例,验证了所设计编队控制算法的有效性。在考虑存在随机扰动情况下,设计了不完全微分 PD 控制器以产生集群控制指令,实现了编队放大与队形保持任务。结果表明,该控制算法能够实现多架四旋翼无人机的编队控制,清晰完整地描述指定编队状态,队形保持的精度较高,与常规 PD 控制相比,具有较强的抗高频干扰能力。

#### 参考文献

[1] 尹高扬,周绍磊,贺鹏程,等. 国外多无人机协同任务分配研究现状及发展趋势[J]. 飞航导弹, 2016(5): 54-58+82.  
Yin Gaoyang, Zhou Shaolei, He Pengcheng, et al. Research status and development trend of multi-UAV collaborative task assignment in foreign countries[J]. Winged Missiles Journal, 2016(5): 54-58+82 (in Chinese).

[2] 韩亮,任章,董希旺,等. 多无人机协同控制方法及应用研究[J]. 导航定位与授时, 2018, 5(4): 1-7.  
Han Liang, Ren Zhang, Dong Xiwang, et al. Research on cooperative control method and application for multiple unmanned aerial vehicles[J]. Navigation Positioning and Timing, 2018, 5(4): 1-7(in Chinese).

[3] Pan Y J, Werner H, Huang Z, et al. Distributed cooperative control of leader-follower multi-agent systems under packet dropouts forquadcopters[J]. Systems & Control Letters, 2017, 106: 47-57.

- [4] Askari A, Mortazavi M, Talebi H A. UAV formation control via the virtual structure approach [J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2013, 28(1): 04014047.
- [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] 贾永楠, 李擎. 多机器人编队控制研究进展[J]. *工程科学学报*, 2018, 40(8): 893-900.  
Jia Yongnan, Li Qing. Research development of multi-robot formation control[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2018, 40(8): 893-900(in Chinese).
- [7] Mas I. Cluster space framework for multi-robot formation control[D]. Santa Clara University, School of Engineering, 2011.
- [8] Kitts C A, Mas I. Cluster space specification and control of mobile multirobot systems [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2009, 14(2): 207-218.
- [9] Agnew M S, Dal Canto P, Kitts C A, et al. Cluster space control of aerial robots [C]// *Proceedings of 2010 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*. IEEE, 2010: 1305-1310.
- [10] 梁晓龙, 刘流, 何吕龙, 等. 基于固定时间一致性的无人机集群构型变换[J]. *系统工程与电子技术*, 2018, 40(7): 1506-1512.  
Liang Xiaolong, Liu Liu, He Lyulong, et al. UAV swarm formation reconfiguration based on fixed-time consensus[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2018, 40(7): 1506-1512(in Chinese).
- [11] Rafifandi R, Asri D L, Ekawati E, et al. Leader-follower formation control of two quadrotor UAVs[J]. *SN Applied Sciences*, 2019, 1(6): 539.
- [12] Johnson Y, Ahamed T P I. Nonlinear modelling of leader-follower UAV close formation flight with dynamic inversion-based control [J]. *International Journal of Modelling, Identification and Control*, 2018, 30(2): 83-92.
- [13] Bao N, Ran X, Wu Z, et al. Research on attitude controller of quadcopter based on cascade PID control algorithm[C]// *Proceedings of 2017 IEEE 2<sup>nd</sup> Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC)*. IEEE, 2017: 1493-1497.
- [14] 全权. 多旋翼飞行器设计与控制[M]. 北京: 电子工业出版社, 2018.  
Quan Quan. Introduction to multicopter design and control[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2018(in Chinese).
- [15] 刘金琨. 先进PID控制MATLAB仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2016.  
Liu Jinkun. Advanced PID control MATLAB simulation[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2016(in Chinese).

(编辑:李瑾)