

基于一致性理论的四旋翼无人机分布式编队控制方法

李 磊¹, 李小民¹, 郑忠贵², 张国荣³

(1. 军械工程学院无人机工程系 石家庄 050000; 2. 第二炮兵研究院 北京 100085;
3. 厦门警备区 福建 厦门 361003)

摘 要: 介绍了图论和群体系统一致性的相关理论, 提出一种分布式四旋翼无人机编队控制方法, 将四旋翼无人机描述为二阶积分器动力系统, 采用相对位置偏差描述编队队形; 根据四旋翼无人机之间通信拓扑关系将四旋翼无人机编队建模为图, 探索了领航跟随法和基于图论法的融合策略, 给出一种有领航者的二阶一致性算法。在该算法下, 编队可以完成编队集结和编队机动等行为, 最后通过仿真实验验证了该方法的有效性。

关键词: 编队控制; 四旋翼无人机; 一致性理论; 二阶积分器; 领航跟随法; 图论

中图分类号: V279; TP242.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)10-0019-05

Consensus Based Distributed Formation Control of Quadrotor UAVs

LI Lei¹, LI Xiao-min¹, ZHENG Zhong-gui², ZHANG Guo-rong³

(1. Department of UAV Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050000, China;
2. The Second Artillery Academy, Beijing 100085, China; 3. Xiamen Garrison Command, Xiamen 361003, China)

Abstract: A distributed control method for formation of quadrotor UAVs is presented with introductions on the fundamental knowledge of graph theory and consensus of swarm system. The quadrotor UAV is described as a second-order integrator dynamic system, and the relative position is used to describe the UAV formation shape. The quadrotor UAV formation is modeled based on the communication topology relationship of quadrotors. The strategy of follower-leader method integrated with graph-based method is explored. A second-order consensus algorithm is presented, with which the fleet can complete formation gathering and formation maneuvering. Finally, the effectiveness of this algorithm is shown through the simulation results.

Key words: formation control; quadrotor UAV; consistency theory; second-order integrator; follower-leader; graph-based

0 引言

近年来, 小型四旋翼无人机因为体积小重量轻, 易受控制, 在不确定环境以及危险环境中能够高效地执行任务, 越来越受人们的重视。单架无人机在完成复杂任务时, 由于自身载荷和传感器性能的不足, 应用日益受到限制, 取而代之的是越来越多的多无人机协同工作完成任务。多无人机编队控制是无人机协同控制领域一项重大基础研究课题, 引起了国内外诸多研究人员的兴趣。编队控制方法主要有领航跟随法、虚拟

结构法、基于行为法和图论法。图论法可以根据无人机之间的通信网络拓扑关系以及编队限制条件将编队问题建模成有向图或无向图, 进而利用比较成熟的图论理论对编队信息流以及编队控制算法进行分析设计, 并且, 图论法可以融合前几种方法, 因而已经逐渐成为编队控制的主流方法^[1]。

网络信息一致性(Consensus)是编队控制的衍生问题^[2], 主要是指多智能体网络通过近邻之间交换位置、速度等可测信息, 利用某种算法使多智能体系统在所关心的协作变量问题上达成一致意见, 从而协同地完成预定任务。一致性概念最早出现在计算机分布式计算当中, 2003年前后, 美国耶鲁大学的Morse、加州理工学院的Murray和Olfati-Saber以及宾州大学的Jadbabaie等人将这种概念引入到网络化的动态系统中, 推动了

收稿日期: 2014-12-24

修回日期: 2015-01-15

基金项目: “十二五”国防预研项目(51325050101)

作者简介: 李 磊(1990—), 男, 河北宁晋人, 硕士生, 研究方向为无人机测控与飞行控制技术。

多智能体信息一致性领域的理论发展。

一致性理论已经被大量应用于地面机器人、水下航行器及多卫星系统在固定拓扑、时变拓扑以及通信存在时延等多种情况下的编队控制研究。文献[3]提出一个多机器人队形控制的模型,将机器人表示成单积分器动力模型,应用一致性理论对多机器人系统队形保持及其稳定性进行了分析;宾夕法尼亚大学 GRASP 实验室的 Kumar 带领研究团队用飞机间相对位置和相对方向描述编队构形,引入相对位置误差,利用一致性算法实现了 4 架四旋翼无人机的紧密编队飞行^[4],但是文献[4]中采用的控制结构是集中式控制结构,对中央控制单元的计算能力要求较高,并且可拓展性差;文献[5]研究了小型四旋翼无人机机群自主编队,在串级控制系统框架下提出一种基于 Hamilton 环的通信拓扑设计方案。目前大多数文献都将智能体描述为一阶积分器动力系统,模型较为简单,然而很多复杂系统必须用二阶甚至高阶系统来描述,控制作用更加准确有效。本文将图论法与领航跟随法相结合,将四旋翼无人机描述为二阶积分器系统,利用二阶一致性算法,在仅有一架无人机获知机群期望飞行轨迹的情况下,针对编队生成和编队机动问题,研究了四旋翼无人机机群在跟随者均能接收到领航者信息的拓扑结构下的编队控制方法。

1 图论和群体系统信息一致性

1.1 图论的基本知识和结论

图是由顶点集合和顶点间的二元关系集合(即边的集合)组成的数据结构,通常记为 $G = (V, E)$,其中顶点集合 $V(G)$ 和边的集合 $E(G)$ 表示为

$$\begin{cases} V(G) = \{v_1, v_2, \dots, v_n\} \\ E(G) = \{(v_i, v_j) : v_i, v_j \in V(G)\} \end{cases} \quad (1)$$

在图 G 中,如果节点 i 和节点 j 有信息交换,则存在边 (v_i, v_j) ;若信息交换是没有方向性的,即存在 $(v_i, v_j) \in E \Leftrightarrow (v_j, v_i) \in E$,则称图 G 为无向图;若信息流只从节点 j 流向节点 i ,即边是有方向性的,则称图 G 为有向图。无向图可以被看作有向图的特殊情况。有向图考虑的是信息单向流动的一般情况,更加符合实际。

图的阶数为该图的节点数 n 。若节点 v_i 与节点 v_j 之间存在边 (v_i, v_j) ,则称节点 v_i 和节点 v_j 是邻接的。若对于图 G 中的每一对节点,都存在一条路径连接两点,则称该图为连通图。在有向图中,如果存在一个边的子集,能够连接图中所有节点,则称这个边子集为一个生成树,称该图包含一个有向生成树。

邻接矩阵用代数矩阵的方式来描述节点之间的位置关系,记邻接矩阵 $A = (a_{ij}) \in \mathbf{R}^{n \times n}$,其中 $a_{ij} =$

$$\begin{cases} 1 & v_i v_j \in E \\ 0 & \text{其他} \end{cases}。记节点 i 的邻居节点为集合 $N_i \subseteq V(G)$,$$

即 $N_i = \{v_j \in V : (v_i, v_j) \in E\}$ 。在无向图中任意节点 i 的度 $d(v_i)$ 定义为节点 i 的邻居 N_i 的个数;在有向图中,节点 i 的度 $d(v_i)$ 等于入度和出度之和,即 $d(v_i) = d_{\text{in}}(v_i) + d_{\text{out}}(v_i)$ 。其中,节点 v_i 的入度和出度分别定义为: $d_{\text{in}}(v_i) = \sum_{j=1}^n a_{ji}$, $d_{\text{out}}(v_i) = \sum_{j=1}^n a_{ij}$ 。无向图/有向图的拉普拉斯矩阵 $L = [l_{ij}] (i, j = 1, 2, \dots, n)$ 采用如下定

$$\text{义: } l_{ij} = \begin{cases} \sum_{k=1}^n a_{ik} & i = j \\ -a_{ij} & i \neq j \end{cases}。上述这些概念对于研究群体$$

系统一致性问题非常重要。

1.2 群体系统信息一致性问题

假设编队中有 n 个航行体,用 $G_n \triangleq (v_n, \mathcal{E}_n)$ 表示各航行体之间的通信拓扑,其中 $v_n = \{1, 2, \dots, n\}$ 为节点集, $\mathcal{E}_n \subseteq v_n \times v_n$ 为边集。令矩阵 $A_n = (a_{ij}) \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 和 $L_n = (l_{ij}) \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 分别是图 G_n 的邻接矩阵和非对称拉普拉斯矩阵。考虑简单的单积分器系统为

$$\dot{\xi}_i = u_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

式中 $\xi_i \in \mathbf{R}^m$ 和 $u_i \in \mathbf{R}^m$ 分别是第 i 个航行体的信息状态和信息控制输入。

一阶积分器系统常见的连续时间一致性算法是

$$u_i = -\sum_{j=1}^n a_{ij}(t) (\xi_i - \xi_j) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

上述两式改写成矩阵形式为

$$\dot{\xi} = -(L_n(t) \otimes I_m) \xi \quad (4)$$

定理 1^[6] 在时不变固定通信拓扑条件下,当且仅当有向通信拓扑存在一簇有向生成树时,航行体编队可渐近到达一致;在时变通信拓扑条件下,航行体编队达到渐近一致的条件则为存在无穷多个一致有界的邻接时间段,使得航行体编队在所有这些时间段内有向通信拓扑的并集含有一簇有向生成树。

考虑航行体编队机动时,航行体的信息状态方程需要用二阶积分动力系统表示。二阶积分器动力系统一致性算法是对一阶积分器动力系统一致性算法的拓展。不同的是,有向图中含有一簇生成树只是二阶积分器动力系统达成一致的必要条件而非充分条件。

考虑这样一个二阶积分器动力系统

$$\begin{cases} \dot{\xi}_i = \zeta_i \\ \dot{\zeta}_i = u_i \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\xi_i \in \mathbf{R}^m$ 为系统信息状态; $\zeta_i \in \mathbf{R}^m$ 为系统信息状态导数; $u_i \in \mathbf{R}^m$ 为系统第 i 个成员的信息控制输入。

假设各无人机之间关于 ξ_i 和 ζ_i 的传递具有相同

的通信拓扑, 同样采用 $G_n \triangleq (v_n, \varepsilon_n)$ 来表示 A_n 和 L_n 分别表示此时图 G_n 的邻接矩阵和非对称拉普拉斯矩阵。一种基本的二阶积分器动力系统一致性算法为

$$u_i = -\sum_{j=1}^n a_{ij}(t) [(\xi_i - \xi_j) + \gamma(t)(\zeta_i - \zeta_j)] \quad (6)$$

式中: $i=1, 2, \dots, n$; $\gamma(t)$ 对任意时间 t 是一个正数。如果 ξ_i 和 ζ_i 分别表示飞行器 i 的位置和速度, 对于所有的 $\xi_i(0)$ 和 $\zeta_i(0)$, 经过式 (6) 的运算, 当 $t \rightarrow \infty$ 时, $\|\xi_i - \xi_j\| \rightarrow 0$ 且 $\|\zeta_i - \zeta_j\| \rightarrow 0$, 此时编队达到或者达成一致。

令 $\xi = (\xi_1^T \ \xi_2^T \ \dots \ \xi_n^T)^T$, $\zeta = (\zeta_1^T \ \zeta_2^T \ \dots \ \zeta_n^T)^T$, 上述两式可改写成矩阵形式为

$$\begin{pmatrix} \dot{\xi} \\ \dot{\zeta} \end{pmatrix} = (\Theta(t) \otimes I_m) \begin{pmatrix} \xi \\ \zeta \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$\text{式中 } \Theta(t) = \begin{pmatrix} 0_{n \times n} & I_n \\ -L_n(t) & -\gamma(t)L_n(t) \end{pmatrix}.$$

定理 2^[7] 算法式 (7) 渐近达到一致, 当且仅当 Θ 有且仅有两个零特征值, 并且其他非零特征值均为负实部。特别地, 对于足够大的 t , $\xi_i(t) \rightarrow \sum_{i=1}^n p_i \xi_i(0) + t \sum_{i=1}^n p_i \zeta_i(0)$, $\zeta_i(t) \rightarrow \sum_{i=1}^n p_i \zeta_i(0)$, 其中 $p = (p_1 \ p_2 \ \dots \ p_n)^T \geq 0$, $I_n^T p = 1$, $L_n^T p = 0$ 。定理的相关证明参见文献 [7]。

2 四旋翼无人机编队系统建模与设计

四旋翼无人机是典型的欠驱动系统, 具有 4 个输入和 6 个输出, 通常分为“X”型和“+”型。四旋翼无人机通过控制 4 个电机和螺旋桨的转速来实现飞机的俯仰、偏航和滚转运动。定义惯性坐标系 $OXYZ$ 和机体坐标系 $oxyz$ 如图 1 所示。

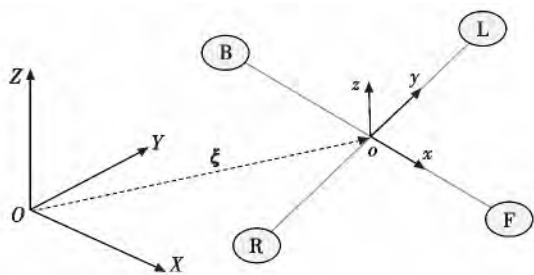


图 1 四旋翼无人机位姿坐标系定义

Fig. 1 Quadrotor UAV position and attitude coordinate system definition

令 $\xi, v \in \mathbf{R}^3$ 为惯性坐标系下四旋翼无人机机体的位置和速度, $\omega \in \mathbf{R}^3$ 为机体坐标系下姿态变化角速度。记 $\mathcal{H} \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$ 为从机体坐标系到惯性坐标系的旋转矩阵, 则

$$\mathcal{H} = \begin{pmatrix} c_\theta c_\psi & -c_\phi s_\psi + s_\phi s_\theta c_\psi & s_\phi s_\psi + c_\phi s_\theta c_\psi \\ c_\theta s_\psi & c_\phi c_\psi + s_\phi s_\theta s_\psi & -s_\phi c_\psi + c_\phi s_\theta s_\psi \\ -s_\theta & s_\phi c_\theta & c_\phi c_\theta \end{pmatrix} \quad (8)$$

式中 $s = \sin(\cdot)$ 和 $c = \cos(\cdot)$ 分别代表正弦和余弦算子。 $\Theta = (\phi \ \theta \ \psi)^T \in \mathbf{R}^3$ 为四旋翼在无人机机体坐标系下系统的欧拉角。令 $e_z = (0 \ 0 \ 1)^T$ 为 z 轴单位向量, $n = \mathcal{H}e_z$ 为姿态矩阵的第 3 列, m 为四旋翼无人机系统的质量, $J = \text{diag}(J^1 \ J^2 \ J^3) \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$ 为系统转动惯量矩阵, g 为重力加速度, 定义 T 为驱动四旋翼无人机位姿变化的 4 个螺旋桨产生的总的升力, $\tau = (\tau_1 \ \tau_2 \ \tau_3)^T$ 分别为横滚、俯仰和偏航 3 个方向的控制力矩。假设飞行器中心与机体坐标系原点重合, 驱动电机无安装误差角, 且认为四旋翼飞行器除旋翼转动外, 其余部分为刚体。选取北、东、地坐标系为惯性坐标系, 本文采取文献 [8] 中的系统模型为

$$\begin{cases} \dot{\xi} = v \\ m\dot{v} = mg e_z - nT \\ \dot{\mathcal{H}} = \mathcal{H}S(\omega) \\ J\dot{\omega} = -\omega \times J\omega + \tau \end{cases} \quad (9)$$

四旋翼无人机位姿控制采用内外环控制结构, 内环控制姿态, 外环控制位置。四旋翼无人机位姿控制器参见文献 [8], 本文主要关心分布式编队控制算法, 编队控制参考文献 [5] 的多闭环串级控制系统结构, 编队控制器通过自身的传感器和无线通信网络获取自身和编队其他成员的状态信息, 输出各自的期望位置和姿态到位姿控制器, 驱动执行器完成编队任务, 如图 2 所示。重点研究基于二阶积分器动力模型的编队控制器的设计。

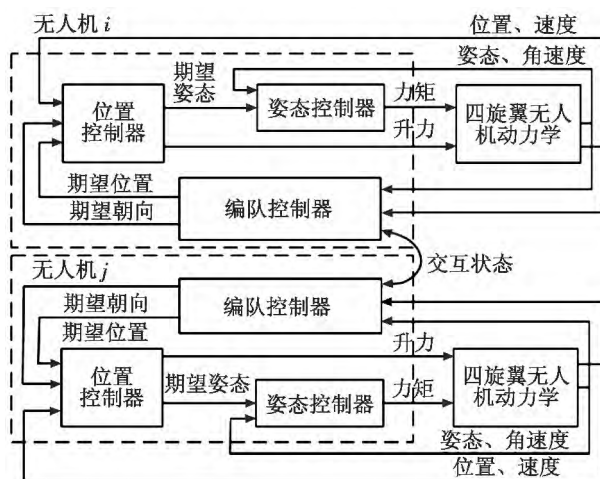


图 2 编队控制系统结构图

Fig. 2 Formation control system structure

假设编队规模为 N , 根据四旋翼无人机之间的信

息交互关系可以将四旋翼无人机编队建模为一个有向图 G , 四旋翼 i 标为有向图中的节点 V_i , 由四旋翼无人机 i 流向四旋翼无人机 j 的信息传递标记为边 e_{ij} , 其中 $i, j=1, 2, \dots, N$. 指定编号为 1 的四旋翼无人机为编队领航者, 其余为跟随者。在编队控制层中, 可以将每个四旋翼无人机看作三维空间中的一个质点, 四旋翼无人机系统满足式 (4), 式中 $\xi_i(t) \in \mathbf{R}^n$ 和 $\zeta_i(t) \in \mathbf{R}^n$ ($n=1, 2, 3$) 分别代表四旋翼无人机 i 的位置信息和速度信息, $u_i(t) \in \mathbf{R}^n$ 是相应的控制输入。假设领航者只向外广播自己的状态信息 ξ^l 和 ζ^l , 其余跟随者都能接收来自于领航者的状态信息。整个编队的拓扑结构如图 3 所示。不考虑领航者、跟随者之间的拓扑关系可以为任意有向图。

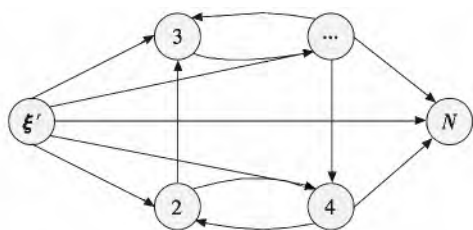


图 3 每个跟随者均可获知领航者信息状态的通信拓扑

Fig. 3 The communication topology by which each follower can acquire leader's information states

编队过程中通信拓扑保持不变, 并且保持固定队形。为了方便分析, 考虑一维空间的简单情况, 三维空间的分析可以利用 Kronecker 积推广得到。

定义编队中心为点 V_c , 其坐标为 R_c 。编队中心 V_c 为一致性算法的一致平衡点, 在有领导者的情况下, V_c 为领导者所在位置, 而在没有领导者的情况下, V_c 为编队队形的几何中心。采用相对位置向量描述编队队形, 定义相对位置偏差 $R_i^* = (x_i^*, y_i^*, z_i^*)$, 其空间位置关系如图 4 所示。

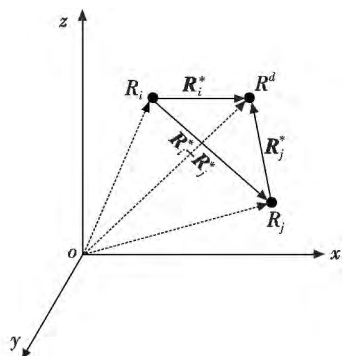


图 4 编队成员空间位置关系示意图

Fig. 4 Spatial relationship of formation member

针对存在领航者的情况, 给出以下一致性算法为

$$u_i(t) = \ddot{v}_x^d - \alpha \{ [x_i - x_i^*] - x^d \} + \gamma (v_{ix} - v_x^d) -$$

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} \{ [x_i - x_i^*] - (x_j - x_j^*) \} + \gamma (v_{ix} - v_{jx}) \} \quad (10)$$

式中: x^d 和 v_x^d 分别为编队领航者的位置和速度信息; α 表示跟随者与领航者的邻接关系, 当跟随者 i 能接收到领航者的状态信息时 $\alpha > 0$, 否则 $\alpha = 0$, 这里取 $\alpha = 1$ 。在该算法中, 跟随者还需要获取领航者的信息状态的二阶导数信息, 即领航者的控制输入。

定理 3^[2] 令 μ_i 为 $-L_n$ 的第 i 个特征值, 再令 $\lambda_i = -\alpha + \mu_i$ 。如果 $\gamma > \bar{\gamma}$, 当 $-L_n$ 的所有 $n-1$ 个非零特征值均为负实部时, $\bar{\gamma} = 0$, 否则, $\bar{\gamma} = \max_{\forall \text{Re}(\lambda_i) < 0 \text{ and } \text{Im}(\lambda_i) > 0} |\mu_i| \cdot \sqrt{\frac{2}{|v_i| \cos\left(\arctan \frac{\text{Im}(\lambda_i)}{\text{Re}(\lambda_i)}\right)}}$ 。那么, 给定的一致性算法

式 (10), 当 $t \rightarrow \infty$ 时, $(x_i - x_i^*) \rightarrow x^d$ 且 $v_{ix} \rightarrow v_x^d$, 其中 $i = 1, 2, \dots, n$ 。

算法式 (10) 能够保证, 当 $t \rightarrow \infty$ 时, $\|x_i - x^d\| \rightarrow x_i^*$, $\|v_{ix} - v_x^d\| \rightarrow 0$, 此时认为编队状态达成一致, 同时编队也生成指定的队形。在编队队形镇定问题中, 每架无人机对编队中心需达成一致意见, 要求编队队形中心位置不变, 且速度为零, 此时可令 $v_0^d = 0$ 。利用该一致性算法, 只需改变通信拓扑 G 以及设置不同的位置偏差 R_i^* , 就可以设计出不同的编队队形。

3 实验仿真

3.1 参数设置

四旋翼无人机控制采用传统的 PID 控制算法, 内环控制姿态稳定, 外环用于位置控制。本实验假设底层控制器设计良好, 在此基础上加入编队控制模块。设置编队规模 $N = 5$, 无人机间的通信拓扑结构如图 5 所示。具体参数设置为: $\alpha = 1$, $\gamma = 2$, 编号为 1 的四旋翼无人机为领航者, 其余 4 架为跟随者, 用以描述期望队形的相对位置偏差设置为 $R^* = (R_1^* \ R_2^* \ R_3^* \ R_4^*) =$

$$\begin{pmatrix} 0 & -0.5 & 0 & 0.5 \\ 0.5 & 0 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}。$$

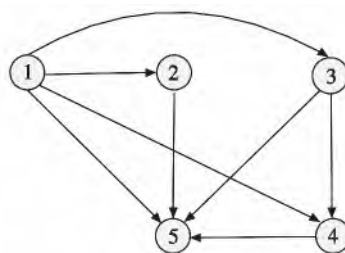


图 5 仿真实验中四旋翼无人机通信拓扑

Fig. 5 Communication topology of UAVs in simulation

本实验设置编队集结和编队机动两种情形。

情形 1 领航者在空中悬停等待编队在指定位置集结,此时,设置 $v^d=0$ 。

情形 2 领航者在空中做定高圆周运动,其他四旋翼无人机跟踪领航者的运动,并最终形成编队进行

机动,领航者的运动轨迹为:
$$\begin{cases} x^d = -\cos t \\ y^d = \sin t \\ z^d = 5 \end{cases}$$
。仿真步长为 0.001 s,仿真时间为 15 s。

3.2 仿真结果

情形 1 的四旋翼无人机机群编队集结如图 6 所示,仿真开始时领航者在空中某位置悬停等待,其他四旋翼无人机从地面起飞,每架四旋翼无人机向相对领航者的预定方向机动,经过一段时间后收敛到以领航者为中心的菱形编队,验证了算法式(10)用于编队集结的有效性。

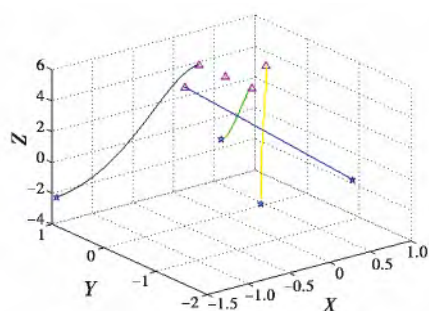


图 6 四旋翼无人机编队生成仿真曲线

Fig. 6 Simulation curve of quadrotor UAV formation generating

情形 2 的四旋翼无人机机群编队机动如图 7 所示,仿真开始时,领航者在空中做圆周运动,跟随者在地面的不同位置,起飞后接收领航者的状态信息,在算法式(10)中,每架跟随者都要用到领航者信息状态的二阶导数,也就是说,跟随者每时每刻都知道领航者的控制输入量,跟随者并不是简单地向领航者聚拢,而是在平面方向跟随领航者做圆周运动,因此呈螺旋状上升,一段时间后,最终收敛到以领航者为中心的编队机动飞行。

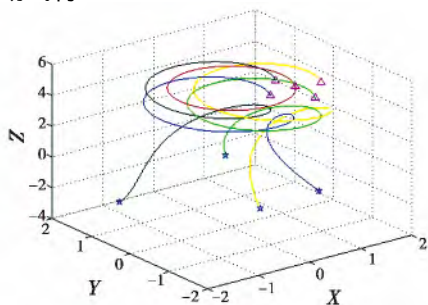


图 7 四旋翼无人机编队机动仿真曲线

Fig. 7 Simulation curve of quadrotor UAV formation maneuvering

图 8 和图 9 分别从 X 方向和 Z 方向更加清楚地展现了情形 2 无人机机群各成员在编队机动过程中位置和速度的变化规律。图 8a 中可以看出,飞机起飞后迅速向领航者靠拢(黑色曲线),在 $t=4$ s 时跟随者距离领航者趋于指定位置,并且能够很好地跟踪领航者的轨迹变化。从图 8b 中可以看出, $t=5$ s 以后,在有领导者一致性算法下,跟随者与领航者速度保持一致,并且能够跟踪领航者速度变化。图 9 描述的是各四旋翼无人机 Z 方向位置和速度变化曲线,其变化规律与 X 方向变化规律大致相同,此处不再赘述。在二阶一致性算法的引导下,四旋翼无人机机群编队收敛速度较快,同步效果良好。

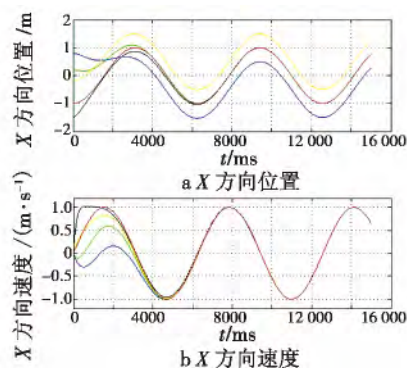


图 8 各四旋翼无人机 X 方向位置和速度变化曲线

Fig. 8 Each UAV's position and velocity change in X-direction

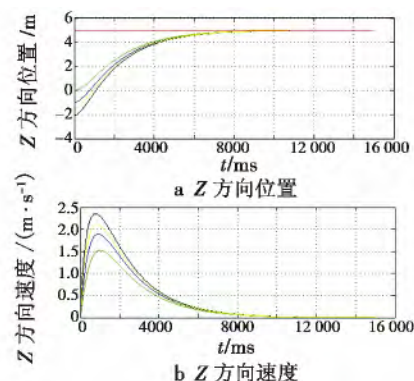


图 9 各四旋翼无人机 Z 方向位置和速度变化曲线

Fig. 9 Each UAV's position and velocity change in Z-direction

4 结束语

针对四旋翼无人机机群编队问题,将四旋翼无人机描述为二阶积分器动力模型,设计了一种基于图论法和领航跟随法相结合的分布式编队控制方法,重点研究了二阶一致性算法在四旋翼无人机机群编队中的应用。在编队控制层将四旋翼无人机看作三维空间的质点,采

(下转第 29 页)

- 829-838.
- [4] 高道祥, 孙增圻, 罗熊, 等. 基于 Backstepping 的高超声速飞行器模糊自适应[J]. 控制理论与应用, 2008, 25(5): 805-810. (GAO D X, SUN Z Q, LUO X, et al. Fuzzy adaptive control for hypersonic vehicle via Backstepping method[J]. Control Theory & Applications, 2008, 25(5): 805-810.)
- [5] 陈洁, 周绍磊, 宋召青. 基于不确定性的超声速飞行器动态面自适应反演控制系统设计[J]. 宇航学报, 2010, 31(11): 2550-2556. (CHEN J, ZHOU S L, SONG Z Q. Hypersonic aircraft dynamic surface adaptive Backstepping control system design based on uncertainty[J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(11): 2550-2556.)
- [6] WANG D, HUANG J. Neural network-based adaptive dynamic surface control for a class of uncertain nonlinear systems in strict-feedback form[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2005, 16(1): 195-202.
- [7] DONG C, HOU Y, ZHANG Y, et al. Model reference adaptive switching control of a linearized hypersonic flight vehicle model with actuator saturation[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, 2010, 224(3): 289-303.
- [8] HU X X, WU L G, HU C H, et al. Adaptive sliding mode tracking control for a flexible air-breathing hypersonic vehicle[J]. Journal of the Franklin Institute, 2012, 349(2): 559-577.
- [9] XU B, SHI Z K, YANG C G, et al. Neural hypersonic flight control via time-scale decomposition with throttle setting constraint[J]. Nonlinear Dynamics, 2013, 73(3): 1849-1861.
- [10] SHEN Q, JIANG B, COCQUEMPOT V. Fault-tolerant control for T-S fuzzy systems with application to near-space hypersonic vehicle with actuator faults[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2012, 20(4): 652-665.
- [11] WANG L X. Fuzzy systems are universal approximators[C]//IEEE International Conference on Fuzzy Systems, San Diego, 1992: 1163-1170.
- [12] 王立新. 自适应模糊系统与控制——设计与稳定性分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995. (WANG L X. Adaptive fuzzy systems and control—design and stability analysis[M]. Beijing: National defense Industry Press, 1995.)
- [13] WANG L X. Stable adaptive fuzzy control of nonlinear systems[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 1993, 1(2): 146-155.

(上接第 23 页)

用有领导者一致性算法, 实现了编队集结和编队机动的控制要求, 并通过 Matlab 仿真验证了一致性编队控制算法的有效性。本文尚未考虑朝向一致问题和工程实现问题, 下一阶段将把朝向一致问题考虑进来, 并重点研究工程实现问题, 开发工程样机实验平台。

参考文献

- [1] 王祥科, 李迅, 郑志强. 多智能体系统编队控制相关问题研究综述[J]. 控制与决策, 2013, 28(11): 1601-1613. (WANG X K, LI X, ZHENG Z Q. Survey of developments on multi-agent formation control related problems[J]. Control and Decision, 2013, 28(11): 1601-1613.)
- [2] REN W, BEARD R W. Distributed consensus in multi-vehicle cooperative control theory and applications[M]. New York: Springer, 2008.
- [3] 吴正平, 关治洪, 吴先用. 基于一致性理论的多机器人系统队形控制[J]. 控制与决策, 2007, 22(11): 1241-1244. (WU Z P, GUAN Z H, WU X Y. Consensus based formation control of multi-robot system[J]. Control and Decision, 2007, 22(11): 1241-1244.)
- [4] MATTHEW T, NATHAN M, VIJAY K. Trajectory design and control for aggressive formation flight with quadrotors[J]. Auton Robot, 2012, 33: 143-156.
- [5] 邢关生, 杜春燕, 宗群, 等. 基于一致性的小型四旋翼机群自主编队分布式运动规划[J]. 控制与决策, 2014, 29(11): 2081-2084. (XING G S, DU C Y, ZONG Q, et al. Consensus-based distributed motion planning for autonomous formation of miniature quadrotor groups[J]. Control and Decision, 2014, 29(11): 2081-2084.)
- [6] OLFATI-SABER R, FAX J A, MURRAY R M. Consensus and cooperation in networked multi-agent system[C]//Proceedings of the IEEE, 2007: 215-233.
- [7] WEI R, ELLA A. Distributed multi-vehicle coordinated control via local information exchange[J]. Robust Nonlinear Control, 2007, 17: 1002-1033.
- [8] 李光春, 王璐, 王兆龙, 等. 基于四元数的四旋翼无人飞行器轨迹跟踪控制[J]. 应用科学学报, 2012, 30(4): 415-422. (LI G C, WANG L, WANG Z L, et al. Trajectory tracking control of quad-rotor UAV based on quaternion[J]. Journal of Applied Sciences, 2012, 30(4): 415-422.)