

引用格式:施书成,曹东,张岑.多无人机编队协同保持的速度矢量场算法[J].电光与控制,2019,26(4):54-58. SHI S C, CAO D, ZHANG C. A velocity vector field algorithm for multi-UAV cooperative formation keeping[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(4):54-58.

## 多无人机编队协同保持的速度矢量场算法

施书成, 曹东, 张岑  
(南京航空航天大学自动化学院, 南京 210016)

**摘要:** 主要对基于速度矢量场的无人机编队协同保持问题进行研究。首先以 Leader-follower 编队为研究对象,建立了无人机数学模型。在此基础上,借鉴人工势场法,引入相对速度矢量,给出无人机间的引力函数和斥力函数,完成了速度矢量场建模。在速度矢量场作用下,无人机编队能够实现队形保持,并保证无人机之间不会相互碰撞。最后搭建仿真验证平台,验证了该算法的可行性和有效性。

**关键词:** 无人机; 协同编队; 速度矢量场法; Leader-follower 法

**中图分类号:** V279 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2019.04.011

## A Velocity Vector Field Algorithm for Multi-UAV Cooperative Formation Keeping

SHI Shu-cheng, CAO Dong, ZHANG Cen

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** This paper focuses on the study of UAV formation keeping based on velocity vector field. Firstly, the Leader-follower formation is taken as the research object, and the mathematical model of the UAV is built. Secondly, by referring to the artificial potential field method, the relative velocity vector is introduced, the attractive force function and the repulsive force function between the UAVs are given, and the modeling of the velocity vector field is completed. Under the influence of the velocity vector field, the UAVs can keep the formation and do not collide with each other. Finally, a simulation verification platform is built to verify the feasibility and effectiveness of the algorithm.

**Key words:** UAV; cooperative formation; velocity vector field method; Leader-follower method

### 0 引言

无人机是一种可以根据预定飞行任务进行自主飞行的飞行器<sup>[1]</sup>。从20世纪90年代开始,无人机技术迅速发展,尤其是单架无人机的飞行控制技术日趋成熟,并在工程实践中得到了很好的应用。但是,在面对复杂多变的自然环境以及瞬息万变的战场时,由于单架无人机存在性能约束,执行任务的效率和准确度会受到限制<sup>[2]</sup>。另外,一旦单架无人机出现故障,整个飞行任务将无法进行。因此,为了弥补单架无人机的不足,满足复杂的任务需求,拓宽无人机的使用范围,针对多无人机协同编队飞行技术的研究显得日益重要<sup>[3]</sup>。

目前,常用的多无人机编队控制方法有 Leader-follower 法、虚拟结构法、行为法和图论法等。其中:Leader-

follower 法的基本思想是指定一架无人机为长机,其余为僚机。在执行任务时,长机负责航迹跟踪,僚机的任务是保持与长机及邻机的相对位置不变<sup>[4]</sup>;在虚拟结构法中,整个编队结构抽象为一个虚拟的刚体,编队位置为刚体上一个固定点,无人机只需追踪各自的固定点就可以保持队形不变<sup>[5]</sup>;行为法是定义一些基本行为,包括追踪目标、规避障碍、碰撞避免以及队形保持等,每架无人机融合基本行为可以得到最终行为<sup>[6]</sup>;图论法将队形表达为控制图的形式,每个节点代表一个无人机,节点间的边代表无人机间的约束关系。利用图论和控制理论从稳定性角度分析问题,获得最优控制策略<sup>[7]</sup>。

从协同任务分配的系统结构角度,无人机队形保持策略大体可以分为集中式、分布式和分散式<sup>[8]</sup>。

早期的无人机编队多采用集中式的控制策略。在集中式飞行编队中,每架无人机将自身的位置、速度、姿态等信息与机群中所有无人机进行交互。这种控制策略的控制精度最高,但是信息交互拓扑结构复杂,对通

收稿日期:2018-05-07

修回日期:2018-06-09

作者简介:施书成(1993—),男,江苏东台人,硕士生,研究方向为先导飞行控制。

信带宽要求高,并且随着编队中无人机数量的增加,机群中的信息传输量会显著增长,限制了编队的扩充性。

在分布式控制策略中,无人机只与相邻无人机进行信息交互,与集中式控制策略相比,大大减小了信息传输量,同时避免了相邻无人机发生碰撞,是当前的研究热点。

在分散式控制策略中,无人机只需要追踪目标编队位置,不与其他无人机进行信息交互。该方法结构简单,易于实现,解决了机群中数据量传输过大的问题,但是控制品质不佳,容易导致机群中无人机发生碰撞。

本文采用分散式控制策略,以1架长机、2架僚机组成的典型三角形 Leader-follower 编队为对象进行多机编队研究。首先给出了长机运动模型以及僚机目标点与实际点之间的偏差值计算方法。在此基础上,引入速度矢量场,以目标编队位置为牵引场源,相邻无人飞机为斥力场源,完成了多机编队的速度矢量场建模。最后,通过搭建仿真验证平台,以某无人飞机为控制对象,建立六自由度模型,对该算法的可行性和有效性进行了验证。

## 1 编队模型建立

在 Leader-follower 无人机编队中,长机根据预设的飞行任务自主飞行,与单机控制方式相同,僚机根据长机位置以及队形要求可以得到目标编队位置。

### 1.1 长机模型建立

如图1所示,以3架无人机构成的三角队形为例,在惯性坐标系下, $x_{ix}$  ( $i=1,2,3$ )为无人机在X轴上的投影位置, $x_{iy}$  ( $i=1,2,3$ )为无人机在Y轴上的投影位置。

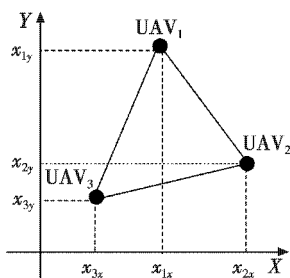


图1 惯性坐标系下编队模型

Fig. 1 Model of formation in inertial coordinates

在不考虑风扰动等外界干扰的情况下,长机 UAV<sub>1</sub> 的数学模型为

$$\begin{cases} \dot{x}_{1x}(t) = V_{1x}(t) \\ \dot{V}_{1x}(t) = u_{1x}(t) \\ \dot{x}_{1y}(t) = V_{1y}(t) \\ \dot{V}_{1y}(t) = u_{1y}(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $V_{1x}(t)$ 和 $V_{1y}(t)$ 分别为长机在X轴和Y轴上的投影速度; $u_{1x}(t)$ 和 $u_{1y}(t)$ 分别为长机在X轴和Y轴上的控制输入。

长机由机载传感器可以得到当前经纬度信息。对于直线航段,根据当前航段方位角 $A$ 、长机与目标航点之间的东向距离 $X$ 以及北向距离 $Y$ ,可以得到长机和航线的关系为

$$\begin{cases} X_d = \cos \theta \times X + \sin \theta \times Y \\ Y_d = \cos \theta \times Y - \sin \theta \times X \end{cases} \quad (2)$$

式中: $X_d$ 表示长机与当前目标航点之间的待飞距离; $Y_d$ 表示长机与规划航线之间的侧偏距离, $Y_d > 0$ 时,无人机位于航线段的右侧,反之,无人机位于航线段左侧;

$$\begin{cases} \cos \theta = X/D \\ \sin \theta = Y/D \end{cases} \quad (3)$$

式中, $D$ 表示目标点与实际点间的直线距离, $D = \sqrt{X^2 + Y^2}$ 。

### 1.2 僚机模型建立

如图2所示,对僚机来说,其理想编队位置与实际编队位置之间的关系可以采用横向距离-纵向距离 $(\Delta x, \Delta y)$ 进行描述。 $\Delta x, \Delta y$ 分别表示僚机实际编队位置与理想编队位置间沿X轴和Y轴的距离<sup>[9]</sup>。

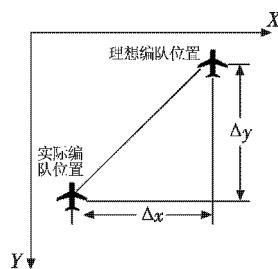


图2 僚机编队位置描述

Fig. 2 Description of the position of the follower

根据编队任务以及长机的经纬度信息,可以得到僚机的理想编队位置。在惯性坐标系下可以得到

$$\begin{cases} X = (111\,412.876 \times \cos \alpha - 93.503 \times \cos 3\alpha) \times (L_1 - L_0) \\ Y = (111\,132.952 - 559.849 \times \cos 2\alpha) \times (B_1 - B_0) \\ D = \sqrt{X^2 + Y^2} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} A = 0 & X = 0, Y \geq 0 \\ A = 180 & X = 0, Y < 0 \\ A = 90 - \arctan(Y/X) & X > 0 \\ A = 270 - \arctan(Y/X) & X < 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: $L_0, B_0$ 分别表示僚机理想编队位置经纬度; $L_1, B_1$ 分别表示僚机当前实际编队位置经纬度; $X$ 表示理想编队位置与僚机实际编队位置间的东向距离; $Y$ 表示理想编队位置与僚机实际编队位置间的北向距离; $D$ 表示僚机实际编队位置与目标点之间的直线距离; $A$ 表

示实际点与目标点之间的方位角。其中,  $\alpha = (B_0 + B_1) / 114.5916$ 。

如图3所示,以目标编队位置为坐标原点,飞行速度方向为  $Y_v$  轴正方向,  $X_v$  轴沿机翼指向右侧,建立速度坐标系。将该坐标系与惯性坐标系通过坐标系转换,可得

$$\begin{cases} X_v = X \times \cos \varphi - Y \times \sin \varphi \\ Y_v = X \times \sin \varphi + Y \times \cos \varphi \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $\varphi$  为僚机目标位置的航向角;  $X_v$  为速度坐标系下,实际点与目标点间的横向距离,  $X_v > 0$  代表实际点在目标点右侧;反之,实际点在目标点左侧;  $Y_v$  表示实际点与目标点间的纵向距离,  $Y_v > 0$  代表实际点在目标点前方。

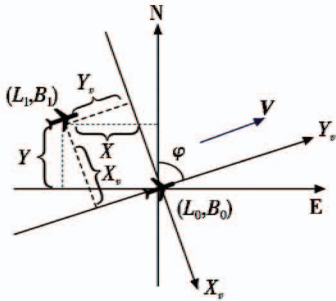


图3 惯性坐标系与速度坐标系转换

Fig. 3 The conversion between the inertial axis system and the speed axis system

## 2 速度矢量场法

在集中式控制与分布式控制策略中,为了实现协同控制,机群中每架无人机都需要和其他无人机时刻保持信息交互。相对于其他两种求解思路,分散式方法虽然不需要占用较多的通信资源,但是增加了无人机间发生碰撞的可能性。因此,为了实现编队的协同控制,防止无人机间发生碰撞,本文引入改进的人工势场法,以速度场代替力场,即速度矢量场法<sup>[10]</sup>。

速度矢量场法的基本原理是在速度场的作用区域内,将目标点与威胁点看作场源,无人机在合速度场的作用下,避开威胁到达目标点<sup>[11]</sup>。

如图4所示,在基于速度矢量场的队形控制策略中,僚机以理想编队位置为目标点,目标点提供引力势场,产生牵引速度  $V_T$ ,牵引僚机向目标点运动;以邻机为中心、最大安全距离为半径的区域作为威胁区域,提供规避场和导引场,规避场提供规避速度  $V_P$ ,将僚机推离威胁区域;导引场提供与规避速度垂直并指向目标点的导引速度  $V_C$ ,使僚机绕过威胁区域的同时向目标点运动。将作用在僚机上的力场叠加,得到合速度为<sup>[12]</sup>

$$\mathbf{V}(t) = \mathbf{V}_P(t) + \mathbf{V}_C(t) + \mathbf{V}_T(t) \quad (7)$$

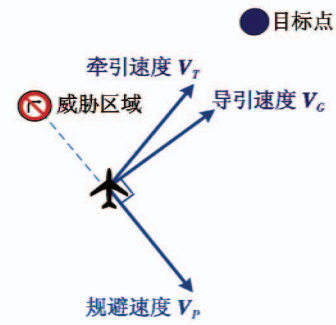


图4 基于速度矢量场的队形控制策略

Fig. 4 Formation control strategy based on velocity vector field

### 2.1 牵引速度模型

当僚机的理想编队位置与实际编队位置不重合,即  $X_v, Y_v \neq 0$  时,引力场提供场源牵引无人机向目标点运动。当无人机距离目标点较远时,考虑到无人机自身性能的约束,牵引速度维持在一个固定值。牵引速度模型为

$$\begin{cases} \mathbf{V}_T(t) = \frac{\omega_T}{\sqrt{X_v^2 + Y_v^2}} \begin{bmatrix} X_v \\ Y_v \end{bmatrix} & d \leq d_{T_{\max}} \\ \mathbf{V}_T(t) = \mathbf{V}_{T_{\max}} & d > d_{T_{\max}} \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $\omega_T$  表示牵引速度可调参数;  $(X_v, Y_v)$  表示速度坐标系下无人机的实际位置;  $d = \sqrt{X_v^2 + Y_v^2}$  表示无人机实际位置与目标点之间的距离;  $d_{T_{\max}}$  表示某一个固定值。

### 2.2 规避速度模型

威胁区域提供导引场与规避场。为了与实际情况相符,并减小计算量,认为威胁区域的作用范围是有限的。超过最大威胁半径  $R_{\max}$  的区域可认为规避速度  $V_P$  与导引速度  $V_C$  都为零。为简化模型,本文不考虑无人机所处的复杂地形环境以及雷达等威胁,仅考虑以其他无人机作为威胁的情况。规避速度模型为

$$\begin{cases} \mathbf{V}_P(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} & d_p > R_{\max} \\ \mathbf{V}_P(t) = \frac{\omega_P}{d_p} \begin{bmatrix} X_v - X_e \\ Y_v - Y_e \end{bmatrix} & d_p \leq R_{\max} \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $(X_v, Y_v)$  表示速度坐标系下无人机的实际位置;  $(X_e, Y_e)$  表示速度坐标系下相邻无人机的位置;  $d_p = \sqrt{(X_v - X_e)^2 + (Y_v - Y_e)^2}$ , 表示两架无人机间的距离;  $\omega_P$  表示规避速度可调参数。

### 2.3 导引速度模型

导引速度与规避速度大小相等,并垂直于规避速度指向牵引速度方向。为确定导引速度方向,首先将规避速度  $V_P$  沿逆时针方向旋转  $\pi/2$ , 得到  $V'_C$  为

$$\mathbf{V}'_C = \mathbf{R}\left(\frac{\pi}{2}\right) \cdot \mathbf{V}_P \quad (10)$$

式中,  $R(\phi)$  为矢量旋转矩阵,  $R(\phi) = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi \\ \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix}$ ,  $\phi$  为规避速度  $V_p$  沿逆时针方向的旋转角度。

接下来计算  $V'_c$  与牵引速度  $V_T$  的夹角  $\gamma$  为

$$\gamma = \arccos\left(\frac{V'_c \cdot V_T}{|V'_c| \cdot |V_T|}\right) \quad (11)$$

规避速度  $V_p$  与牵引速度  $V_T$  之间的夹角应小于  $\frac{\pi}{2}$ , 因此, 导引速度可表示为

$$V_c(t) = \begin{cases} R\left(\frac{\pi}{2}\right) \cdot V_p & \gamma > \frac{\pi}{2} \\ R\left(-\frac{\pi}{2}\right) \cdot V_p & \gamma \leq \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (12)$$

### 3 仿真实验

为了验证基于 Leader-follower 编队的速度矢量场算法的可行性, 需要开发仿真验证软件。本文在 C# 开发平台上, 搭建了飞行控制仿真环境, 如图 5 所示。

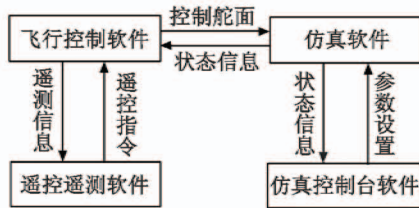


图5 飞行控制仿真环境  
Fig.5 Flight control simulation

飞行控制软件主要包括导航制导模块、控制律解算模块和执行机构模块等, 根据无人机所处的速度矢量场, 对无人机的速度、姿态进行控制; 仿真软件主要解算无人机六自由度模型, 根据飞行控制软件输入的舵面信息, 解算出无人机当前的姿态角、航迹角、高度, 各个轴系的速度、角速度等状态信息, 并反馈给飞行控制软件。

本文对 1 架长机、2 架僚机组成的 Leader-follower 编队进行仿真验证。长机与僚机之间的距离设定为 100 m, 2 架僚机之间的距离为 141 m, 组成等腰直角三角形编队。无人机间的威胁半径设置为 100 m, 即当 2 架无人机间的距离小于 100 m 时, 规避场和导引场发挥作用, 防止无人机之间相互碰撞。

仿真结果如图 6 ~ 图 8 所示。

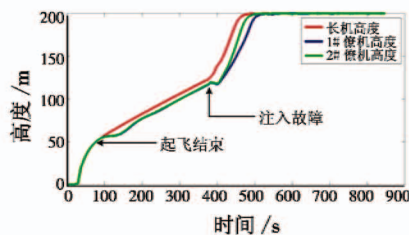


图6 飞行高度  
Fig.6 Flight height

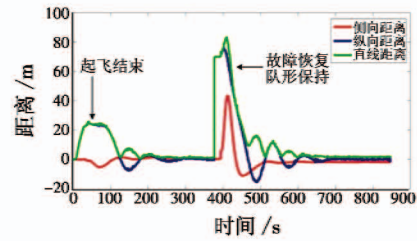


图7 1#僚机与目标点距离  
Fig.7 Distance between 1# follower and target spot

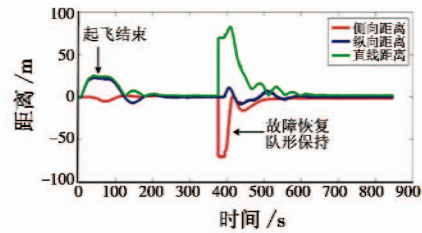


图8 2#僚机与目标点距离  
Fig.8 Distance between 2# follower and target spot

长机和各僚机在起飞阶段不接入控制律解算模块, 进行自主起飞。从图 6 可以看出, 在给出“起飞”指令后的第 78 s 左右, 各无人机飞行高度达到 50 m, 起飞结束。长机开始按照航线信息进入自主爬升段, 僚机跟随长机爬升, 并开始受到速度矢量场的控制, 进行横侧向和纵向距离调整。由图 7 和图 8 可以看出, 在速度矢量场的作用下, 僚机逐渐向目标编队位置靠近, 并在 200 s 左右开始精确地跟踪目标编队位置, 误差值保持在  $\pm 1$  m 内。

为了测试无人机编队的鲁棒性, 在第 380 s 给 2 架僚机注入故障, 屏蔽目标位置信息。当故障发生时, 长机改变航向, 向左后方飞行, 僚机根据当前横侧向飞行模式, 自主选择向左或者向右盘旋, 5 s 后故障恢复。此时, 1#僚机实际位置位于目标位置的前方 74.5 m、右侧 42.7 m 处, 2#僚机实际位置位于目标位置前方 11.3 m、左侧 70.7 m 处。在牵引力场作用下, 2 架僚机纵向方向上速度减小, 逐渐向目标点靠近。在横侧向, 无人机通过副翼和方向舵产生滚转角和偏航角, 修正侧向偏差向目标点靠近。经过 280 s 调整, 僚机实际位置与目标点在横侧向和纵向距离的误差值最终保持在  $\pm 2$  m 内。

图 9 所示为引入速度矢量场的分散式编队中各无人机与其他无人机之间的距离变化曲线。

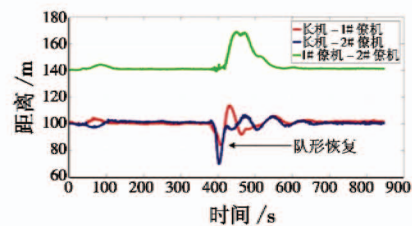


图9 分散式控制策略下各无人机间的距离  
Fig.9 The distance between UAVs under decentralized control strategy

当故障发生时,1#僚机、2#僚机根据当前横侧向模态选择了向左盘旋。由图中可以看出,长机和僚机之间的距离迅速接近,进入威胁区域。在斥力场和导引场的作用下,僚机被长机向远处推离,越接近长机的无人机规避速度越大。在整个故障发生和队形恢复过程中,长机与僚机之间的距离保持在74 m以上。

图10为传统集中式控制策略下各无人机与其他无人机之间的距离变化曲线。

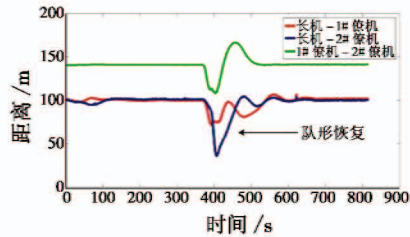


图10 集中式控制策略下各无人机间的距离

Fig.10 Distance between UAVs under the centralized control strategy

在仿真开始运行后的第380 s长机与僚机之间的通信断开,模拟通信故障,5 s后通信恢复。故障发生时,长机改变航向,向左后方飞行,僚机向左盘旋。从图10中可以看出,长机与僚机之间的距离迅速靠近。在故障恢复后,因为僚机当前的速度、姿态一时难以调整,长机与僚机之间的距离继续接近,最近距离可达36 m。

从仿真结果可以看出,针对分散式 Leader-follower 编队,在编队空间建立矢量场,不仅可以实现队形保持,而且可以保证无人机之间不会相互碰撞。传统集中式编队的队形保持依赖于机群中的信息交互,若机群中的通信出现故障,将会威胁到编队的安全。

#### 4 结束语

本文将速度矢量场法引入 Leader-follower 飞行编队控制方式,建立了长机与僚机的数学模型,给出了僚机和目标点之间横侧向与纵向距离的计算方法,搭建了

速度矢量模型,通过仿真测试验证了将速度矢量场法引入编队控制的有效性。

#### 参考文献

- [1] STEVENS B L, LEWIS F L, JOHNSON E N. Aircraft control and simulation[M]. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2003.
- [2] 叶媛媛. 多UCAV协同任务规划方法研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2005.
- [3] 韩冰,张秋菊,徐世录. 无人战斗机的现状与发展趋势[J]. 飞航导弹,2005(10):45-49, 64.
- [4] KEVICZKY T, BORRELLI F, FREGENE K, et al. Decentralized receding horizon control and coordination of autonomous vehicle formations[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2008, 16(1):19-33.
- [5] LEWIS M A, TAN K H. High precision formation control of mobile robots using virtual structures[J]. Autonomous Robots, 1997, 4(4):387-403.
- [6] YUN X P, ALPTEKIN G, ALBAYRAK O. Line and circle formation of distributed physical mobile robots[J]. Journal of Robotic Systems, 1997, 14(2):63-76.
- [7] 任德华,卢桂章. 对队形控制的思考[J]. 控制与决策, 2005, 20(6):601-606.
- [8] 钱志丛. 无人机编队飞行队形控制研究[D]. 厦门:厦门大学,2011.
- [9] 程晓明. 无人机双机协同航迹规划技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2015.
- [10] 张凤,孙哲,刘美菊. 基于 Leader-follower 与人工势场的多移动机器人编队控制[J]. 沈阳建筑大学学报:自然科学版,2010, 26(4):803-807.
- [11] 程晓明,曹东,李春涛. 多无人机协同航迹规划技术研究[J]. 航空计算技术,2014, 44(4):71-75.
- [12] 朱旭,闫茂德,张昌利,等. 基于改进人工势场的无人机编队防撞控制方法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2017, 38(6):961-968.