

基于速度矢量场的无人机编队防碰撞控制方法

张岑,曹东,施书成

(南京航空航天大学 自动化学院,江苏 南京 211106)

摘 要:多无人机编队飞行过程中,无人机既要跟随领航者飞行,又要能够避免无人机的机间碰撞。以 leader-follower 编队和速度矢量场为基础,采用双向通信的信息交互拓扑结构,设计了无人机编队的自主防碰撞控制方法。设计了系统牵引速度和规避威胁速度,依照编队系统中每架无人机的优先级引入速度分量可调参数,动态调整合速度中每个分速度的比例,以保证编队中每架无人机能够躲避其他无人机,同时按照正确的航迹运动。完成了速度矢量场建模,搭建仿真验证平台,验证该方法的可行性。

关键词:无人机编队;速度矢量场;信息交互拓扑;防碰撞控制

中图分类号:V279 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2020)05-0188-04

Anti-collision Control Method of Unmanned Aerial Vehicle Formation Based on Velocity Vector Field

ZHANG Cen, CAO Dong, SHI Shucheng

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: In the multi-UAV formation flight, the drones must follow the pilot's flight and avoid collision each other. Based on the leader-follower formation and velocity vector field, this paper designs the anti-collision strategy for UAV formation using the information interaction topology of two-way communication. The system traction speed and the avoidance threat speed are set up. According to the priority of each drone in the formation system, the speed component adjustable parameters are introduced, and the proportion of each sub-speed in the combined speed is dynamically adjusted to ensure that each UAV in the formation can avoid other drones while moving in accordance with the correct track. Then, the velocity vector field modeling is completed. And the verification platform for the simulation is built, which is used to verify the feasibility of the strategy.

Keywords: drone formation; velocity vector field; information interaction topology; Anti-collision control

0 引言

无人机是一种无人驾驶飞行器,主要由无线电遥控或自身程序控制^[1]。无人机具有适应性强、安全性好、成本相对较低、隐蔽性好等特有的优势,在民用领域和军事领域都受到了重用^[2]。与单个无人机相比,多个无人机协同飞行可以大大提高任务执行效率,因此无人机编队飞行控制技术受到广泛关注。安全性是无人机编队系统优劣的一项关键评价指标,所以在无人机编队系统中加入防碰撞控制方法很有必要。

目前,在无人机编队控制领域,出现了很多不同的队形控制方法,常用的方法有 leader-follower 法、基于行为法、虚拟结构法以及图论法等,每一种控制方法都有其优缺点。leader-follower 法就是指定编队中的一架无人机为长机,其余无人机为僚机。长机在获得地面站发出的指令后,按照指定航迹进行飞行,其余僚机只需跟随长机的运动状态变化即可,包括速度变化、航向变化和高度变化^[3]。相比其他方法,该方法原理简单、可控性强、灵活性较好。

本文采用 leader-follower 队形控制策略、双向通信的信息交互拓扑,对一架长机、两架僚机组成的无人机编队进行研究。针对无人机编队过程中的机间碰撞问题,构建了速度矢量场模型,给出编队防碰撞控制方法。根据防碰撞方法,在 C#平台上搭建了多机编队的仿真系统,通过仿真验证自主防碰撞控制方法的准确性和有效性。

1 基本概念

1.1 速度矢量场基本原理

Khatib 首先提出了人工势场法,用以解决机器人和障碍物之间的自主防碰撞问题。人工势场法的基本思想就是将控制对象的周围环境抽象为势能场,目标点对被控对象产生“引力”,障碍物对被控对象产生“排斥力”,被控对象在合力作用下避开障碍物,移动到目标点^[4]。速度矢量场法改进了传统的人工势场法,用合速度代替合力驱动规划对象向目标点运动,相比人工势场法,具有实现容易、快速性更好等优点。

速度矢量场的基本原理就是将目标点和障碍物作为速度场源,在场源作用区域内,每一个被控对象都有一个速度矢量。无人机在合速度的作用下避开障碍物飞向目标点^[5]。图1为速度矢量场基本原理示意图。

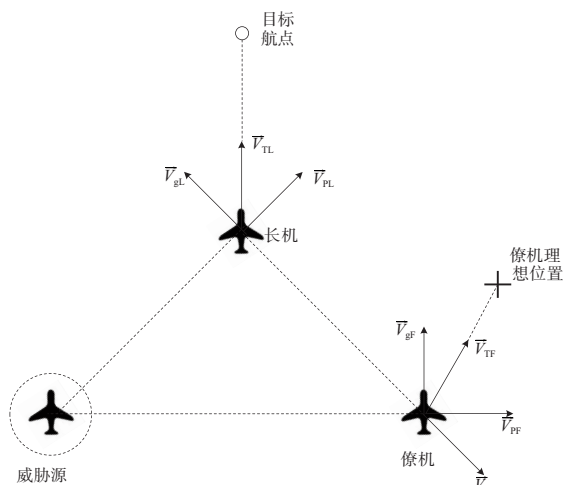


图1 速度矢量场基本原理示意图

在无人机编队中,目标航点是长机的引力场源,僚机理想位置是僚机的引力场源, \$\vec{V}_{TL}\$ 和 \$\vec{V}_{TF}\$ 分别为长机和僚机的牵引速度。编队中所有无人机都会产生速度场,对于其作用区域内的其他无人机而言,其都可以被视为障碍物,所以令无人机质点为圆心,速度场作用距离为半径的圆形范围为威胁区域。当图1中长机和僚机进入威胁区域时,受到规避场和导引场的作用,分别产生导引速度 \$\vec{V}_{gl}\$ 和 \$\vec{V}_{gf}\$、规避速度 \$\vec{V}_{pl}\$ 和 \$\vec{V}_{pf}\$,导引速度、规避速度即可合成规避威胁速度。僚机如果在长机的速度场作用范围内,会产生规避长机速度 \$\vec{V}_{lf}\$。

由于本文未考虑地理环境、雷达等外部威胁,因此简化了速度矢量场模型。在速度矢量场驱动下,各速度的矢量和改变了无人机的飞行轨迹,避免编队内的机间碰撞。

1.2 信息交互拓扑结构

无人机编队飞行过程中,只需要使用通信网络拓扑中的部分通信链路进行信息交互,就可以实现编队任务。这些被使用的链路的集合就构成无人机编队的信息交互拓扑^[6]。在多无人机的协同编队过程中,各无人机之间定时相互传递位置、姿态信息,能够有效避免编队内无人机间的碰撞,图2为本文无人机编队的信息交互拓扑结构。

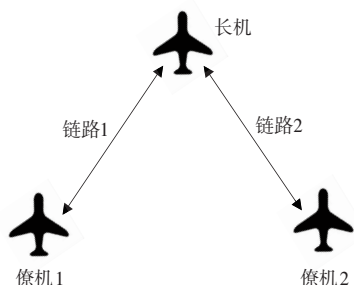


图2 无人机编队网络拓扑结构图

为了实现编队,长机需要向次一级无人机发送经纬度、高度、速度、航向等信息。考虑到编队的安全性,长机也需要知道僚机的状态,因此僚机也需要向长机反馈经纬度、姿态信息,于是僚机之间可以通过长机间接收到对方的位置状态。由于 leader-follower 编队中存在位置误差的传递迭代,越后面的僚机与上一级长机的位置误差越大^[7],因此无人机之间也需要传递位置误差信息,以便于下一级僚机进行编队位置修正。

2 速度矢量场建模

2.1 牵引速度模型

无人机机群稳定向目标位置飞行,是编队控制的重要目标之一。牵引速度模型分为长机牵引速度模型、僚机牵引速度模型。

1) 长机牵引速度模型

目标航点作为牵引速度场源,引导长机向目标航点稳定飞行,在飞向目标航点过程中,都会受到牵引速度作用。长机牵引速度如图1 \$\vec{V}_{TL}\$ 所示,随着长机离目标航点距离的变化,牵引速度也发生变化,牵引速度表达式如下:

$$\vec{V}_T(t) = \begin{cases} \frac{k_1 S_m^2}{S_1^2 d_1} \begin{bmatrix} x_i - x_1 \\ y_i - y_1 \end{bmatrix} & d_1 \in (0, S_1] \\ \frac{k_1 S_m^2}{d_1^3} \begin{bmatrix} x_i - x_1 \\ y_i - y_1 \end{bmatrix} & d_1 \in (S_1, S_m] \\ \frac{k_1}{d_1} \begin{bmatrix} x_i - x_1 \\ y_i - y_1 \end{bmatrix} & d_1 \in (S_m, +\infty) \end{cases} \quad (1)$$

式中: \$(x_1, y_1)\$ 为惯性坐标系下长机当前位置坐标; \$(x_i, y_i)\$ 为长机的目标航点坐标; \$d_1 = \sqrt{(x_i - x_1)^2 + (y_i - y_1)^2}\$ 表示长机和目标航点的距离;牵引速度 \$\vec{V}_T\$ 的方向为由长机当前坐标指向目标航点坐标; \$k_1\$ 为随长机飞行任务和飞行环境变化的可调参数; \$S_m\$ 代表长机探测航点的最大距离; \$S_1\$ 为小于 \$S_m\$ 的可调参数。综合考虑到本次仿真无人机的机动性能和编队仿真系统,令 \$k_1 = 4, S_1 = 100\$ m, \$S_m = 300\$ m。

2) 僚机牵引速度模型

当僚机未到达理想编队位置时,理想编队位置处引力场源可提供牵引速度牵引僚机飞向理想位置。僚机牵引速度的方向由僚机当前位置指向理想位置,表达式为:

$$\begin{cases} \vec{V}_T(t) = \frac{k_2}{d_2} \begin{bmatrix} x_i - x_f \\ y_i - y_f \end{bmatrix} & d_2 \in (0, d_{Tmax}] \\ \vec{V}_T(t) = \vec{V}_{Tmax} & d_2 \in (d_{Tmax}, +\infty) \end{cases} \quad (2)$$

式中: \$(x_i, y_i)\$ 为惯性坐标系下僚机理想编队位置坐标; \$(x_f, y_f)\$ 为僚机当前位置坐标; \$d_2 = \sqrt{(x_i - x_f)^2 + (y_i - y_f)^2}\$ 表示僚机实际位置与理想位置之间的距离;依据无人机机动性能,取 \$d_{Tmax} = 50\$ m; \$k_2\$ 是僚机牵引速度可调参数,其中 \$k_2 = 4, \vec{V}_{Tmax}\$ 代表当 \$d_2 = d_{Tmax}\$ 时 \$\vec{V}_T(t)\$ 的值。

2.2 规避威胁速度模型

威胁信息即是编队中的其他无人机,为了贴合实际情况

况及简化模型,威胁信息的作用区域等效为一个固定半径的圆形,在威胁圆的作用区域内,提供规避场和导引场。显然在无人机编队飞行过程中,应极力避免进入相邻无人机威胁区域。如图3所示,将无人机等效为质点,以其所在位置为圆心、 R_a 为半径的圆为警戒区域,一般情况下 R_a 约等于两倍无人机翼展大小,相邻无人机进入可能会发生碰撞。质点为圆心, $R_{\max}$ 为半径的圆为威胁区域作用范围,超过威胁半径 $R_{\max}$,不受威胁场作用,即规避速度与导引速度都为0。

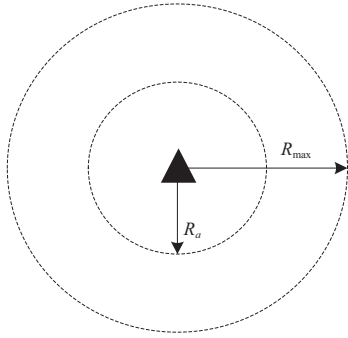


图3 威胁区域作用示意图

规避速度方向由威胁源中心指向无人机,将无人机推离威胁区域^[8],无人机 i 对进入其威胁区域的无人机威胁速度表达式为:

$$\begin{cases} \vec{V}_p^i(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} & d_3 \in (R_{\max}, +\infty) \\ \vec{V}_p^i(t) = \frac{\omega_{pi}}{d_3} \begin{bmatrix} x_c - x_i \\ y_c - y_i \end{bmatrix} & d_3 \in (0, R_{\max}) \end{cases} \quad (3)$$

式中: (x_c, y_c) 为受规避场作用无人机位置坐标; (x_i, y_i) 为产生规避场的无人机 i 位置坐标; $d_3 = \sqrt{(x_c - x_i)^2 + (y_c - y_i)^2}$ 表示两架无人机间距离; $R_{\max}$ 根据实际情况设定; ω_{pi} 表示规避速度控制参数,表达式如下:

$$\omega_{pi} = \begin{cases} k_3 \cdot \left(\frac{R_{\max}^i}{b_1}\right)^2, & d_3 \in (0, b_1] \\ k_3 \cdot \left(\frac{R_{\max}^i}{d_3}\right)^2, & d_3 \in (b_1, R_{\max}^i] \\ 0, & d_3 \in (R_{\max}^i, +\infty) \end{cases} \quad (4)$$

式中: k_3 是规避速度可调整参数,其大小与受规避场无人机的优先级有关,优先级越高, k_3 越大; $R_{\max}^i$ 表示无人机 i 的威胁区域半径; b_1 为无人机 i 的警戒区域半径,其值至少等于两倍无人机 i 翼展。

导引速度与规避速度大小相等、方向垂直,且指向牵引速度方向,引导无人机避开威胁区域。如果将规避速度 $\vec{V}_p$ 逆时针旋转 $0 \sim \pi$ 角度过程中,出现与当前无人机 i 牵引速度 $\vec{V}_t$ 同向时刻,则导引速度表达式为:

$$\vec{V}_g^i(t) = \mathbf{R}\left(-\frac{\pi}{2}\right) \cdot \vec{V}_p^i(t) \quad (5)$$

否则导引速度表达式为:

$$\vec{V}_g^i(t) = \mathbf{R}\left(\frac{\pi}{2}\right) \cdot \vec{V}_p^i(t) \quad (6)$$

式(5)、式(6)中 $\mathbf{R}(\theta)$ 为矢量旋转矩阵:

$$\mathbf{R}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (7)$$

当无人机进入相邻无人机的威胁区域时,规避威胁速度即是规避速度、导引速度的叠加,表达式如下:

$$\vec{V}_a^i(t) = \vec{V}_p^i(t) + \vec{V}_g^i(t) \quad (8)$$

2.3 躲避长机速度模型

在无人机编队飞行过程中,长机的优先级较高,所以在僚机进入长机威胁区域内时,应主动避让长机,避免无人机间碰撞事故的发生。由此便形成了躲避长机速度,方向由长机指向僚机,通过与规避威胁速度的叠加,产生的合速度使相邻的僚机能够及时规避长机,避免发生碰撞。躲避长机速度表达式为:

$$\vec{V}_{lF}(t) = \frac{\omega_n}{d_4} \begin{bmatrix} x_F - x_L \\ y_F - y_L \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: (x_F, y_F) 为僚机位置坐标; (x_L, y_L) 为长机位置坐标; $d_4 = \sqrt{(x_F - x_L)^2 + (y_F - y_L)^2}$ 表示两架无人机间距离; ω_n 为躲避长机速度控制参数,表达式如下:

$$\omega_n = \begin{cases} k_4 \cdot \left(\frac{R_{\max}}{b_2}\right)^2, & d_4 \in (0, b_2] \\ k_4 \cdot \left(\frac{R_{\max}}{d_4}\right)^2, & d_4 \in (b_2, R_{\max}] \\ 0, & d_4 \in (R_{\max}, +\infty) \end{cases} \quad (10)$$

式中: k_4 表示僚机躲避长机速度调整参数,根据实际情况可调整; $R_{\max}$ 表示长机威胁区域作用半径; b_2 为警戒区域半径,其值至少为两倍长机翼展。

2.4 合速度模型

在一般情况下,编队飞行中的长机只需跟踪规划好的航迹进行自主飞行,只有当相邻的僚机进入长机的警戒区域内时,长机才会主动避让,所以长机规避合速度表达式为:

$$\vec{V}_p(t) = \sum_{i=1}^{i=n} \vec{V}_p^i(t) \quad (11)$$

僚机的规避速度等于躲避长机速度与规避其他无人机速度的矢量和,表达式为:

$$\vec{V}_p(t) = \sum_{i=1}^{i=n} \vec{V}_p^i(t) + \vec{V}_{ZL}(t) \quad (12)$$

对于编队中所有无人机而言,导引速度合速度为:

$$\vec{V}_g(t) = \sum_{i=1}^{i=n} \vec{V}_g^i(t) \quad (13)$$

在编队飞行过程中,队中无人机在合速度的作用下合理避开周围威胁无人机,向目标点飞行,其运动轨迹为:

$$S = \int_{t_0}^t (\vec{V}_p(t) + \vec{V}_g(t) + \vec{V}_T(t)) dt \quad (14)$$

3 仿真验证及分析

防碰撞控制一直是无人机编队研究的重点和难点。本次仿真实验以一架长机、两架僚机组成的编队系统为研究对象,采用长机分别与两个僚机双向通信的信息交互拓

扑结构,在C#开发平台上搭建仿真软件,以验证无人机编队防碰撞控制方法的有效性。

在无人机编队仿真系统中,长机与僚机1、僚机2的距离初始值都为100 m,两架僚机的间距初始值为140 m,初始队形为等腰三角形,威胁区域半径均设定为80 m。图4为无人机编队正常起飞时的仿真系统示意图,其中导航地图中蓝色飞机图标0为长机,绿色飞机图标1为僚机1,黄色飞机图标2为僚机2,红色航线(细实长线)为长机目标航线(本刊黑白印刷,有关疑问咨询作者)。

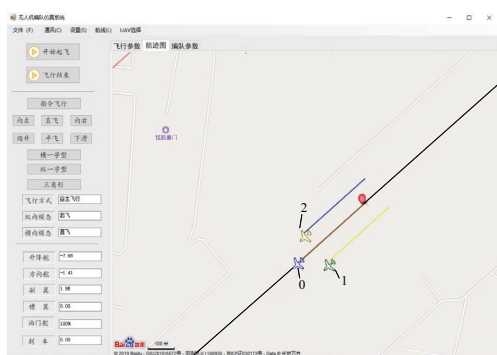


图4 起飞时刻无人机编队仿真系统示意图

在无人机编队以三角形队形飞行过程中,某一时刻通过队形变换将两架僚机目标位置设为同一点,图5为有、无防碰撞控制方法下两僚机间距对比示意图。

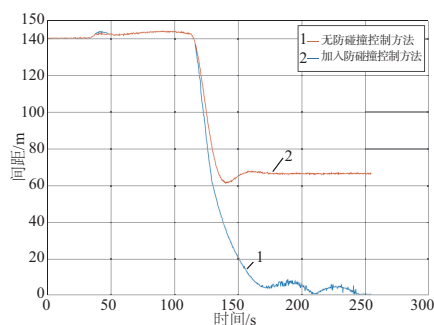


图5 有、无防碰撞控制方法下两僚机间距对比图

如图5中1曲线所示,在仿真开始后,无人机编队按照初始的三角形队形飞行。在第113 s,发送控制指令进行队形变换,将僚机1、僚机2的目标位置设置为同一点。由于仿真系统中没有加入自主防碰撞控制方法,两架僚机迅速进行位置调整,间距急剧减小,最终减少到0,两架僚机发生了碰撞事故。

如图5中2曲线所示,在点击仿真运行后的第113 s,通过飞控指令将两架僚机的目标编队位置设为同一点,然后两架僚机的间距迅速减小,在第138 s时两架僚机的间距降到最小值61 m,不会发生碰撞。最终两架僚机间的距离维持在66 m左右。由此可知,在防碰撞控制方法的作用下,即使两架僚机的目标点相同,编队系统也会进行自主调整,避免无人机间碰撞,保证编队的安全性。

当编队系统没有加入防碰撞控制方法时,如图6中1

曲线所示,仿真开始后,在第120 s点击纵一字型编队指令,此时僚机1减速飞向长机正后方,僚机2加速飞向长机正前方,长机与僚机2的间距越来越小,在第210 s时减少至0,长机与僚机2发生碰撞。

当编队系统中加入防碰撞控制方法后,如图6中2曲线所示,在第120 s发送纵一字型编队遥控指令。在僚机2飞向长机正前方的过程中,其间距越来越小,在186 s减少至最小值43 m左右,不会发生碰撞,此时僚机2进入了长机和僚机1的威胁区域,受到长机与僚机1威胁场作用,在规避威胁速度和牵引速度之合速度作用下,僚机2到达目标点,顺利完成纵一字型编队。

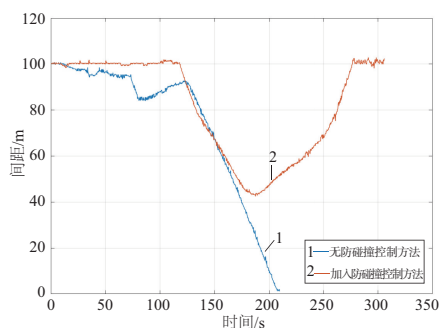


图6 有、无防碰撞控制方法下长机与僚机2间距对比图

4 结语

以三架无人机组成的 leader-follower 编队为研究对象,在速度矢量场法和双向信息交互拓扑结构的基础上,搭建了无人机编队的速度矢量场模型,提出了编队防碰撞控制方法,实现了无人机编队过程中的自主防碰撞。通过仿真实验,验证了所提出的防碰撞控制方法的有效性,对其在工程上的应用具有一定的借鉴性。

参考文献:

- [1] 郭迎,吴蕴翔. 人工智能背景下的无人机手势识别设计研究[J]. 科技创新与应用, 2018,13(22):38-39.
- [2] 潘华,毛海涛. 无人机编队飞行面临问题与关键技术研究[J]. 现代电子技术, 2014,37(16):77-79.
- [3] 钟韶君. 基于地面测控的无人机编队飞行控制系统[J]. 机械制造与自动化, 2017,48(1):180-182,22.
- [4] 安林芳,陈涛,成艾,等. 基于人工势场算法的智能车辆路径规划仿真[J]. 汽车工程, 2017,12(5):125-128.
- [5] 于涛. 基于改进蚁群算法的三维无人机路径规划的研究与实现[D]. 重庆:重庆大学, 2017.
- [6] 王国强. 面向队形保持的无人机编队信息交互拓扑优化问题的研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2016.
- [7] 倪良巧. 基于智能技术的多无人机协同编队飞行[D]. 南京:南京航空航天大学, 2016.
- [8] 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.

收稿日期:2019-05-23