

DOI: 10.7652/xjtuxb201809023

基于一致性算法的无人机协同编队避障研究

张佳龙¹, 闫建国¹, 张普¹, 王奔驰²

(1. 西北工业大学自动化学院, 710129, 西安; 2. 空军工程大学航空工程学院, 710038, 西安)

摘要: 基于人工势场方法,提出了一种双向网络连接结构的多无人机一致性避障控制算法。该算法能够有效避免无人机之间以及无人机与障碍物之间发生碰撞,实现协同编队飞行,完成任务。将所提出的一致性算法与“长机-僚机”控制策略结合起来应用到编队控制中,能够避免无人机之间以及无人机与障碍物之间发生碰撞,确保无人机编队收敛。文中以 3 架无人机构成正三角形编队作为控制对象,以长机飞行轨迹作为期望路径,僚机跟踪长机保持正三角形编队飞行,且无人机之间以及无人机与靠近障碍物内侧的僚机与障碍物保持安全距离,长机和僚机在水平面具有相同的前进速度和航向角速率,在垂直方向保持相对距离不变。通过仿真实验验证了所提出的控制算法的有效性,对工程应用具有一定的借鉴意义。

关键词: 双向网络连接结构;一致性控制算法;避障;路径规划;飞行稳定性

中图分类号: TP237 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2018)09-0168-07

Collision Avoidance of Unmanned Aerial Vehicle Formation Based on Consensus Control Algorithm

ZHANG Jialong¹, YAN Jianguo¹, ZHANG Pu¹, WANG Benchu²

(1. School of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China;

2. College of Aeronautics Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: A collision avoidance control algorithm for multiple unmanned aerial vehicles(UAVs) based on bidirectional network connection structure is proposed, which can effectively avoid collision among UAVs and between UAVs and obstacles to realize collaborative formation flight and complete the mission. In order to avoid collisions, the proposed consensus algorithm and the “leader-follower” control strategy are combined into formation control to ensure the convergence of formation. Three UAVs constitute the triangular formation as the control object, where the leader flight path is taken as the expected path and the followers track the leader to maintain the triangle formation flight. Safe distances should be kept between the UAVs and between the obstacle and the follower which is closest to the obstacle. In the horizontal plane, the leader and followers should have the same forward speed and heading angle rate, while in the vertical direction, they keep the relative distance constant. This consensus collision avoidance algorithm for multiple UAVs is based on the artificial potential field method, and simulation experiment verifies its validity.

Keywords: bidirectional network connection; consensus-based control algorithm; collision

收稿日期: 2018-03-14。 作者简介: 张佳龙(1990—),男,博士生;闫建国(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60974146,61473229)。

网络出版时间: 2018-06-01

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20180601.1047.002.html>

avoidance; path planning; flight stability

相比单机而言,多无人机编队具有很多显著的优势,其在军事领域续航时间长、作战半径大、侦查范围广、作战效率高、搜索能力强等,在民用领域可喷洒农药、航拍、地形勘测以及空中加油等,因此受到很多学者的关注,成为研究的热点^[1]。目前,在航迹规划^[2-4]、协同编队控制、信息共享和融合^[5-7]以及避障等方面的研究已取得了一些明显的成果,但大多数研究均是基于理论层面展开的,本文主要针对无人机编队避障方面展开理论研究。

无人机编队飞行,安全问题是首要考虑的关键因素之一,避障研究就显得尤为重要。近年来,针对多无人机编队飞行避障问题已提出许多控制算法,取得了良好的控制效果。控制避障算法大致分为基于优化的方法和基于规则的方法两类。基于优化的方法采用模型预测控制(MPC)^[8];基于规则的方法以人工势场为理论基础^[9-10]。人工势场方法不仅应用于无人机避障,还拓展到了自适应机器人导航,其基本原理是在设定的复合场中人工势场力沿负梯度方向移动,本文基于这一原理,提出一种人工势场避障方法,应用于无人机编队控制。本文所提出的基于一致性算法对于单机和三机模型同样简化处理,主要突出算法无人机在三维空间中协同编队避障控制方面的优势,确保3架无人机组成的编队能够收敛于长机所设定的运动轨迹,同时在编队中靠近障碍物内侧的无人机与障碍物保持安全距离,即相对距离误差收敛到较小的稳定值。本文的控制目标为3架无人机构成的正三角编队队形,无人机之间的网络拓扑结构由已有文献中的单向连接拓展为双向连接,一方面每架无人机安装有位置和姿态控制器,长机在既定的轨迹飞行,将编队的飞行信息发送至两僚机,僚机根据指令快速追踪长机,形成正三角形编队,防止与障碍物发生碰撞;另一方面,运用人工势场的方法模拟电势场,3架无人机构成三角形编队,每架无人机处于动态平衡,一旦它们之间的相对距离小于平衡状态的距离就会发生排斥,而它们之间的相对距离大于平衡状态的距离就会吸引,使得无人机之间避免发生碰撞,达到避障的目的,同时确保编队按照既定的队形飞行。

文献[11]中无人机编队仅在水平面按照期望轨迹飞行,没有在三维空间做编队飞行,而本文控制算法能够有效地在垂直方向避障,比前人提出的算法更加完善和灵活。将本文提出的基于一致性协同控

制算法和应用人工势场的方法应用到无人机编队中,能够同时在水平面和垂直方向进行有效避障。

1 问题描述

对于多无人机的协同编队飞行,将一致性算法植入无人机控制器中^[12-14],可有效避免无人机之间以及无人机与障碍物之间碰撞。下面采用双向网络拓扑结构建立三机编队系统模型。

1.1 双向网络连接结构

图论是多无人机编队建模的数学工具,其中包含有向生成树,在树形结构双向拓扑网络连接中,任意两点之间不产生闭合回路,每个无人机可以双向传输各自的信息,实现分层管理。它的优点是扩充方便、灵活,易推广到多无人机编队,可靠性高。在无人机编队避障过程中,长机在前,僚机在后,长机按照期望的路径飞行,同时将飞行姿态和位置指令发送至僚机,僚机按照长机的指令飞行。在此过程中,长机将飞行指令发送至僚机,僚机接收指令调整姿态反馈至长机,同时僚机之间也通过信息交互,保持相对位置不变,这些都是双向拓扑网络连接,使得避障的可靠性增加。无人机编队双向网络拓扑结构如图1所示。

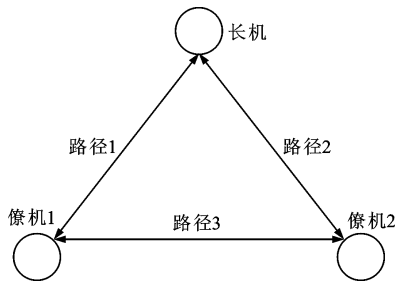


图1 无人机编队双向网络拓扑结构

由图1可以看出,长机和两架僚机以及僚机之间的通信均为双向,即路径1、路径2和路径3都是双向通信。多无人机在编队飞行、避障以及空中加油过程中,双向通信有利于无人机编队协同飞行完成各项任务。同时,当编队中无人机数目扩充到 N ($N>3$)架时,稳定性和可靠性均能得到改善。

1.2 定义控制目标

在3架无人机编队系统执行一次作战任务过程中,2架僚机之间、僚机与长机之间以及3架无人机与运动障碍物之间均未发生碰撞,且按照正三角形编队飞行,都能够收敛于时变的预期轨迹飞行,而时

变预期轨迹由编队的队形决定,即长机所设定的轨迹。3架无人机构成的编队系统,以长机为领航,两僚机按照长机发送的指令追踪直到集结为正三角形编队队形。为了更好地控制无人机编队以正三角形编队飞行,做以下两点假设:

(1)在网络拓扑结构中,每架无人机均能够接受来自长机发出的指令,同时两僚机之间通讯也是畅通的,除此之外,在三机编队模型网络拓扑结构中,任意两机之间是双向联系;

(2)长机的运动不依赖任何僚机,即长机运动不受任意一架僚机的影响,按照设定的轨迹飞行。

2 避障方法

多无人机编队飞行时,为了防止机群之间以及单机与障碍物之间发生碰撞,避障方法显得尤为重要。本文同时采用“长机-僚机”控制策略和人工势场方法来防止无人机之间,以及无人机与障碍物之间发生碰撞。

2.1 “长机-僚机”控制方案

在编队中,采用“长机-僚机”模型可以实现机动的灵活性和可控性,其控制模型如图2所示。长机获得地面指挥部发出的指令后,按照预期轨迹飞行,两僚机保持与长机的相对距离和方向不变。在编队中,考虑数据传输过载,使用双向拓扑结构,而且每架无人机都被定义,长机与僚机以及两僚机之间进行时效性通讯,这将有效地防止因通讯数据过大导致多无人机之间发生信息传输堵塞的现象。

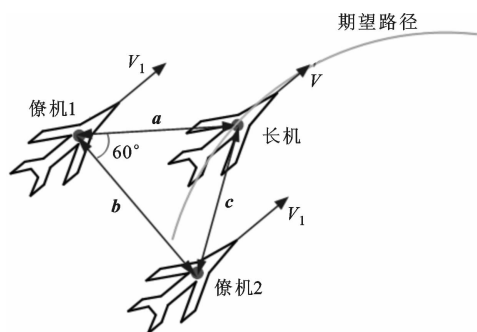


图2 “长机-僚机”控制模式示意图

根据以上分析,详细的控制框图如图3所示。为了控制无人机编队按照预期轨迹飞行,提出内外环兼容控制的两种控制方案。外环的主要任务是控制每架无人机的位置、姿态、前行速度以及预期设定的轨迹。基于外环产生的控制指令,内环接受指令产生舵偏,副翼指令使无人机按照预期的高度飞行。本文集中于编队控制,避免无人机之间发生碰撞,内

环不作详细讨论,外环采用一致性算法。

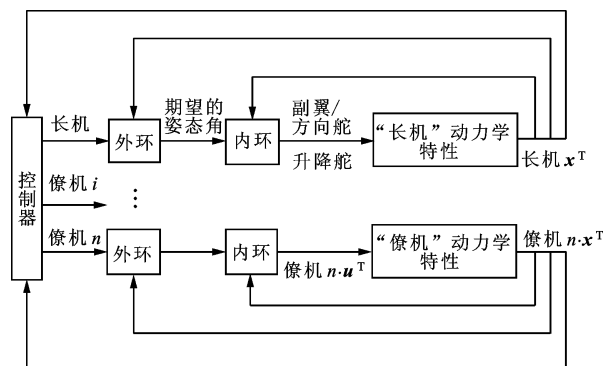


图3 “长机-僚机”控制框图

2.2 基于人工势场方法

在无人机编队系统中,由于3架无人机构成正三角形队形,两僚机与长机具有对称性,因此选择任意一架僚机(下文简称僚机)与长机作为研究对象,其编队飞行避障示意图如图4所示。

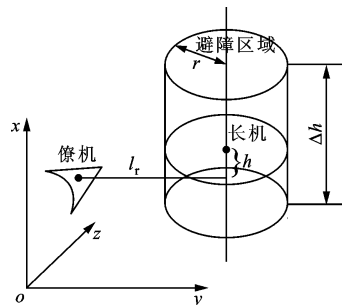


图4 编队飞行避障示意图

为了防止无人机之间发生碰撞,设定任意一架无人机的安全区域为以长机的质心为圆心、 r 为半径、 Δh 为高度的圆柱体范围。无人机在各自的安全区域内飞行,如果它们之间的安全区域发生重叠,此时应该采取规避机动,直到避开重叠区域。垂直方向僚机和长机的相对高度 h 与水平方向它们之间的相对距离 l_r 的关系为

$$r_r = |r_1 - r_f|; h_a = \sqrt{(h_1 - h_f)^2} \quad (1)$$

$$h_r = |h_1 - h_f|; r_a = \sqrt{(x_1 - x_f)^2 + (y_1 - y_f)^2} \quad (2)$$

式中: r_r 、 r_a 分别为机体坐标系和惯性坐标系下长机与僚机之间的距离; r_1 、 r_f 分别为长机、僚机在机体坐标系中的位置。僚机与长机之间的人工势场为

$$U_r = \begin{cases} \frac{K_h}{2} \left(\frac{1}{|h_r| + 1} - \frac{1}{\Delta h + 1} \right)^2, & |h_r| \leq \Delta h \text{ 或者 } |l_r| \leq 2r \\ 0, & \text{其余} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $K_h \in \mathbf{R}$ 是一个正实数的增益。由上式可知,如果僚机与长机在垂直方向互相远离,则人工势场

减小,反之增大;如果僚机与长机的安全区域没有重叠,则人工势场为零。

由式(3)可得僚机与长机之间的平均势场为

$$U_i = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1, j \neq i}^N U_{ij}, i \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (4)$$

由式(4)可知,在多无人机编队中,每架无人机产生的人工势场总和为

$$U_c = \sum_{i=1}^N U_i \quad (5)$$

针对本文的三机编队系统,它们之间的人工势场总和为

$$\left. \begin{aligned} U_t &= U_1 + U_2 + U_3 \\ U_1 &= \frac{1}{2}(U_{12} + U_{13}) \\ U_2 &= \frac{1}{2}(U_{21} + U_{23}) \\ U_3 &= \frac{1}{2}(U_{31} + U_{32}) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

为防止僚机与长机发生碰撞,提出人工势场力如下

$$f_{ca_i} = -\nabla h U_c, i \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (7)$$

式(7)没有局部极小值,由于重叠区域内复合场仅由斥力场组成,其矢量形式如下

$$f_{ca} = -\nabla U_c = -\left[\frac{\partial U_c}{\partial U_1}, \frac{\partial U_c}{\partial U_2}, \dots, \frac{\partial U_c}{\partial U_N} \right] \quad (8)$$

人工势场力沿着负梯度方向移动,即削弱这种场强作用,因此它的作用是使两无人机之间的垂直距离范围变大,达到避障的目的。

3 避障控制算法

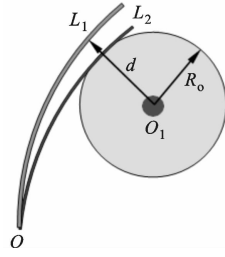
3.1 无人机编队避障

无人机编队在整个飞行过程中,3架无人机构成的正三角形编队队形保持固定不变,且它们具有相同的前行速度,共同的姿态,共处于一个平面内,基于“长机-僚机”控制策略和人工势场避障方法,编队系统可以简化为一个刚性质点,同时圆柱形障碍物可以简化为一个圆,则无人机编队系统避障问题可以简化成一个质点绕过一个圆,且不与之相切。不论障碍物是静止还是运动,质点与圆的相对关系要确保是相切或是相离,以避免发生碰撞,其示意图如图5所示。

无人机系统与障碍物之间的关系为

$$|d - R_o| \geq 0 \quad (9)$$

式中: R_o 为障碍物的半径; d 为无人机在轨迹 L_1 上与障碍物中心的相对距离。



O 表示无人机系统; O_1 表示障碍物几何中心; L_1 、 L_2 分别表示无人机系统在 t_1 、 t_2 两个时刻的轨迹

图5 无人机避障示意图

地面指挥部控制编队满足式(9)的关系,即可避免无人机编队与障碍物发生碰撞,实现避障目的。

3.2 无人机之间避障

3架无人机构成的编队系统组成被控对象,即控制目标,针对控制目标之间在三维空间编队飞行的避障,采用控制算法在水平面和垂直方向进行有效控制^[15]。为了在无人机之间进行有效的避障,采用一致性算法使无人机编队之间在垂直方向采取规避机动,而在水平面按照控制指令进行正三角形编队飞行。本节主要考虑采用一致性算法在垂直方向且障碍物是运动情形下的避障研究。

无人机在垂直方向编队飞行时,可将被控对象分为两类:一是3架无人机构成编队系统作为控制体;二是将无人机编队系统的每架无人机看成控制对象。应用一致性协同算法实现控制体的协同编队飞行,保持队形不变;应用“长机-僚机”控制策略实现每架无人机集结后成编队飞行。在编队中,长机直接与两僚机保持联系,发送当前位置和期望位置指令,确保僚机调整姿态和速度,追踪长机呈正三角形编队。本文控制算法的优势在于,编队无人机拓扑结构是双向连接,它们之间的信息传递时效性强,可防止因单机传输信息量过载发生堵塞现象。

无人机编队中,无人机 i 的控制律如下式所示

$$\tilde{T}_{total_i}(t) = - \sum_{j=1}^{N+1} a_{ij} \left[\sum_{k=0}^1 \gamma_k (\hat{h}_i^{(k)} - \hat{h}_j^{(k)}) \right] \quad (10)$$

$$i, j \in \{1, 2, \dots, N+1\}; k \in \{0, 1\}$$

$$\hat{h}_j^{(k)} = h_j^{(k)} - h_{h_j}^{(k)} \quad (11)$$

式中: $\gamma_k \in \mathbf{R}$ 为正实数控制增益; $h_j^{(k)} \in \mathbf{R}$ 表示无人机 j 在垂直方向的状态; $h_{h_j}^{(k)} \in \mathbf{R}$ 表示在垂直方向无人机 j 与长机预期的相对状态; $i, j = N+1$ 时,无人机为长机。

本文提出的无人机编队避障控制算法的避障能力如下式所示

$$\tilde{T}_i = f_{from_i} + f_{ca_i}, i \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (12)$$

式中: f_{from_i} 表示在垂直方向编队飞行的控制算法的避障能力; f_{ca_i} 表示人工势场避障算法的避障能力。

引理 假设多无人机编队系统为由一架长机和 N (≥ 2) 架僚机构成的线性化模型, 且满足假设(1)(2)。控制算法(式(10))中 γ_k 为正的增益, 且 $k \in \{0, 1\}$, 同时式(3)中控制参数 k_h 为正实数, 均满足每架无人机。

证明 对于每架无人机应用控制算法(式(10)), 可以得到下式

$$\dot{h}_i^{(1)} = - \sum_{j=1}^{N+1} a_{ij} \left[\sum_{k=0}^1 \gamma_k (\hat{h}_i^{(k)} - \hat{h}_j^{(k)}) \right] + f_{\text{ca}_i} \quad \left. \begin{matrix} i \in \{1, 2, \dots, N\} \end{matrix} \right\} \quad (13)$$

此处定义状态矢量 $\bar{h}^{(k)} = [h_1^{(k)} \ h_2^{(k)} \ \dots \ h_N^{(k)} \ 0]^T \in \mathbf{R}^{N+1}$ 和 $\hat{h}^{(k)} = [\hat{h}_1^{(k)} \ \hat{h}_2^{(k)} \ \dots \ \hat{h}_{N+1}^{(k)}]^T \in \mathbf{R}^{N+1}$, $k \in \{0, 1\}$, 定义新的人工势场力 $\bar{f}_{\text{ca}} = [f_{\text{ca}}^T \ 0]^T \in \mathbf{R}^{N+1}$ 。使用新定义符号, 将式(13)写成如下矩阵形式

$$\dot{\bar{h}}^{(1)} = -\gamma_0 \mathbf{L} \bar{h}^{(0)} - \gamma_1 \mathbf{L} \hat{h}^{(1)} + \bar{f}_{\text{ca}} \quad (14)$$

式中: $\mathbf{L} \in \mathbf{R}^{(N+1) \times (N+1)}$ 是多无人机编队系统图论中拉普拉斯矩阵; 状态矢量 $\hat{h}^{(k)}$ 由无人机的状态矢量和来自长机的指令构成。本文对拉普拉斯矩阵的任意一行进行研究, 如下式所示

$$\left. \begin{matrix} a_i(N+1) = \sum_{j=1}^{N+1} a_{ij} - a_{i1} - a_{i2} - \dots - a_{iN} \\ a_{ii} = 0, \quad i \in \{1, 2, \dots, N\} \end{matrix} \right\} \quad (15)$$

根据已知的 $d_{N+1}^{(k)} = 0, k \in \{0, 1\}$ 以及式(15), 式(14)可表示为

$$\dot{\bar{h}}^{(1)} = -\gamma_0 \mathbf{M} \bar{h}^{(0)} - \gamma_0 \mathbf{M} \bar{h}^{(0)} + \gamma_0 \bar{\mathbf{M}} \bar{h}_{N+1}^{(0)} + \gamma_1 \bar{\mathbf{M}} \bar{h}_{N+1}^{(0)} + \gamma_0 \mathbf{M} d_h^{(0)} + \gamma_0 \mathbf{M} d_h^{(0)} + f_{\text{ca}} \quad (16)$$

其中 $\mathbf{M} \in \mathbf{R}^{N \times N}$ 。由式(16)定义变量 $\mathbf{h}^{(k)} = [h_1^{(k)} \ h_2^{(k)} \ \dots \ h_N^{(k)}]^T$, $\bar{h}_{N+1}^{(k)} = \mathbf{I}_N \otimes \bar{h}_{N+1}^{(k)} \in \mathbf{R}^N$, $\mathbf{d}_h^{(k)} = [d_{h_1}^{(k)} \ d_{h_2}^{(k)} \ \dots \ d_{h_N}^{(k)}]^T \in \mathbf{R}^N$, 其中 $\otimes$ 表示克罗内克积符号, $\mathbf{I}_N = [1 \ 1 \ \dots \ 1]^T \in \mathbf{R}^N$ 。此处矩阵 $\mathbf{M}$ 和拉普拉斯矩阵相似, 但不相等

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1j} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2j} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{N1} & a_{N2} & \dots & a_{Nj} \end{bmatrix}, \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (17)$$

已知矩阵 $\mathbf{M}$, 方程(16)可简化成如下矩阵形式

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} h^{(0)} \\ h^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_N & \mathbf{I}_N \\ -\gamma_0 \mathbf{M} & -\gamma_1 \mathbf{M} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h^{(0)} \\ h^{(1)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0}_N \\ f_{\text{ca}} \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{0}_N & \mathbf{I}_N \\ \gamma_0 \mathbf{M} & \gamma_1 \mathbf{M} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{h}_{N+1}^{(0)} \\ \bar{h}_{N+1}^{(1)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0}_N & \mathbf{I}_N \\ \gamma_0 \mathbf{M} & \gamma_1 \mathbf{M} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_h^{(0)} \\ d_h^{(1)} \end{bmatrix} \quad (18)$$

式中: $\mathbf{I}_N \in \mathbf{R}^{N \times N}$ 表示 N 维单位矩阵; $\mathbf{0}_N \in \mathbf{R}^N$ 表示 N 维零向量。

首先求微分方程(18)的解, 通过解的特征来研究其稳定性。方程(18)对应的其次微分方程的解为

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} h^{(0)} \\ h^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_N & \mathbf{I}_N \\ -\gamma_0 \mathbf{M} & -\gamma_1 \mathbf{M} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h^{(0)} \\ h^{(1)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0}_N \\ f_{\text{ca}} \end{bmatrix} \quad (19)$$

此处构建李雅普诺夫函数 V , 其由多无人机(本文为3架无人机)编队系统总能量构成, 表达式为

$$V = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{h}}^T \dot{\mathbf{h}} + \frac{1}{2} \gamma_0 \mathbf{h}^T \mathbf{M} \mathbf{h} + U_c \quad (20)$$

将 V 对时间求导可得

$$\dot{V} = \dot{\mathbf{h}}^T (\ddot{\mathbf{h}} + \gamma_0 \mathbf{M} \dot{\mathbf{h}}) + \dot{U}_c = -\gamma_1 \dot{\mathbf{h}}^T \mathbf{M} \dot{\mathbf{h}} + \dot{\mathbf{h}}^T f_{\text{ca}} + \dot{U}_c \quad (21)$$

由式(7)可得

$$\dot{U}_c = \dot{\mathbf{h}}^T \nabla U_c = -\gamma_1 \dot{\mathbf{h}}^T f_{\text{ca}} \quad (22)$$

联立式(21)和(22)可得

$$\dot{V} = -\gamma_1 \dot{\mathbf{h}}^T \mathbf{M} \dot{\mathbf{h}} \quad (23)$$

V 表示无人机编队之间人工势场的能量函数, 通过对其研究可以判断编队之间避障的能力, 实现地面站有效的控制, 达到避障的目的。如果无人机编队系统构成的拓扑结构满足本文的假设(1)(2), 则多机编队系统模型就会有一个生成树。从拉普拉斯矩阵的特性知, 矩阵 $\mathbf{L}$ 有一个特征值为零, 除去零特征值以外的其他特征值为正实数。根据矩阵 $\mathbf{L}$ 特性结合矩阵 $\mathbf{M}$ 与 $\mathbf{L}$ 的相似关系, 可得 $\mathbf{M}$ 是正定矩阵, 即 $\mathbf{M} > \mathbf{0}$; 在式(3)中, 人工势场参数 K_h 为正值, 则 $U_c \geq 0$ 。因此, 函数 V 由3部分能量构成, 当控制参数 γ_0 和人工势场公式中 K_h 均大于0, 可知函数 $V \geq 0$; 当且仅当控制参数 γ_0 和人工势场公式中 K_h 均等于0, 可知函数 $V = 0$ 。特别指出当 $h = 0, \dot{h} = 0$ 以及 $U_c = 0$ 同时满足条件, 则函数 $V = 0$ 。需要强调, 当无人机之间安全区域没有重叠, 即圆柱体之间没有交集, 此时 $U_c = 0$ 。

对于李雅普诺夫导数 $\dot{V}$, 当控制增益 γ_1 为正值, 根据 $\mathbf{M} > \mathbf{0}$, 可得 $\dot{V} \leq 0$; 当且仅当 $\dot{h} = 0$, 可得 $\dot{V} = 0$; 在微分方程(17)中, 除去同时满足 $h = 0, \dot{h} = 0$ 以及 $U_c = 0$, 可得 $\dot{V} = 0$ 以外, 其余条件使得 $\dot{V} \neq 0$ 。根据 LaSalle's 不变性原理^[16], 李雅普诺夫定理可以解决能量函数的稳定性。

当两架无人机之间的安全区域没有重叠情形

下,微分方程(18)的特解可以表示为

$$\begin{bmatrix} h^{(0)} \\ h^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{h}_{N+1}^{(0)} \\ \tilde{h}_{N+1}^{(1)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_h^{(0)} \\ d_h^{(1)} \end{bmatrix} \quad (24)$$

可以通过式(24)证明方程(18)的有效性,此处不再赘述。由于长机提供给每架无人机的是预期状态指令,而不是预期输入指令,则 $\tilde{h}_{N+1}^{(2)} = 0, d_h^{(2)} = 0$, 它们分别表示长机的输入和长机与无人机之间的输入误差。

综上所述,微分方程(18)的通解等于其对应的其次方程的通解加上本身的特解。因此,当控制增益 γ_h 和人工势场表达式中 K_h 选择合适的正值时,则方程(18)渐进收敛于

$$\begin{bmatrix} h^{(0)} \\ h^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{h}_{N+1}^{(0)} \\ \tilde{h}_{N+1}^{(1)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_h^{(0)} \\ d_h^{(1)} \end{bmatrix}, \text{当 } t \rightarrow \infty \quad (25)$$

这是来自长机指令的收敛结果,根据式(25)任意一行元素,可证明在纵向每架无人机具有的避障能力将会使其收敛于期望的预定轨迹,构成正三角形编队。

4 仿真实验及分析

4.1 初始条件设置

通过仿真实验验证所提避障算法的有效性,需要做以下3个方面的假设:

- (1)障碍物的运动速度和前行的方向是恒定的;
- (2)在编队飞行中,长机的姿态和位置都是通过地面指挥所发出的指令;
- (3)长机与僚机之间的通信是同步的。

无人机的对地速度和障碍物的运动速度为 56 m/s,每架无人机的质量为 90 kg,俯仰角速率的极限值为 $10 (^{\circ})/\text{s}$,偏航角速率极限值为 $10 (^{\circ})/\text{s}$;在垂直方向,为了满足建模和仿真的所有条件,编队的控制增益和避障控制参数分别设置为 $\gamma_0 = 1.5, \gamma_1 = 3, k_h = 5.5$,每架无人机的安全区域圆柱体高度 $\Delta H = 3 \text{ m}$ 、横截面半径 $\Delta R = 3.5 \text{ m}$ 。在垂直方向,无人机之间的高度差小于 1.2 m,同时在水平面内无人机之间的相对距离小于 10 m,无人机之间通过植入的算法计算,进行避障。

4.2 实验结果

基于仿真的初始条件和假设,3架无人机编队避障仿真图如图6~图8所示。

由图6和图7可知,运动的障碍物以等速定高飞行,它与无人机编队的安全距离为 45 m,在刚开始的 5 s,无人机编队靠近障碍物,此时无人机编队

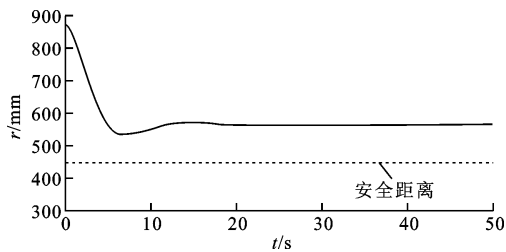


图6 无人机编队与障碍物相对横侧向距离的变化曲线

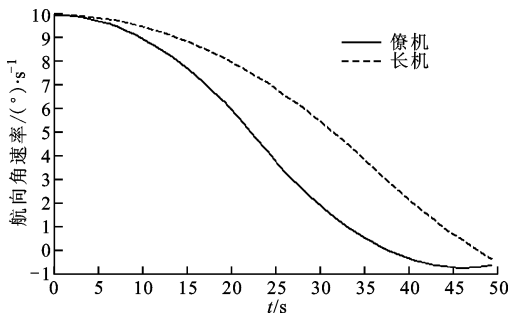
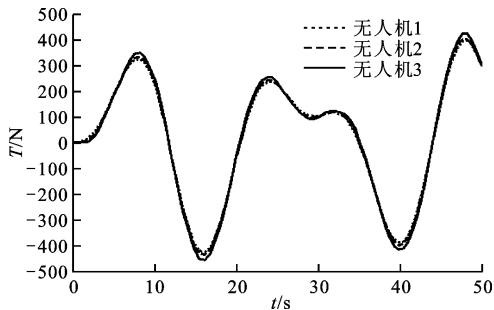
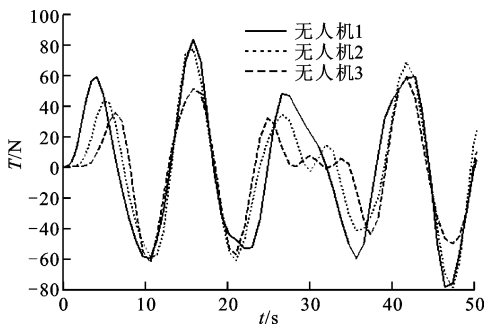


图7 无人机避障航向角速率的变化曲线

识别障碍物,启动避障算法,5~15 s进行规避机动,15 s之后无人机编队与障碍物在横侧向保持相对距离为 8 m。在此期间,长机的航向角逐渐减小,为确保避障安全且保持队形,两僚机的航向角也随之减小,成功避障后,按照既定的轨迹飞行。



(a)未加入避障算法时间响应



(b)加入避障算法时间响应

图8 无人机编队中每架无人机的推力变化曲线

由图8a可知,为了保证无人机编队飞行信息一致性,3架无人机构成正三角形编队系统,每架无人

机保持相同的推力指令协同编队飞行;由图 8b 可知,加入避障控制算法后,3 条曲线相互之间有偏差,且峰值有所不同。这是由于无人机编队遇到障碍物时以长机飞行轨迹为预定路径,两僚机追踪长机,此时长机必须采取横侧向偏转和垂直方向升降进行避障机动,而僚机根据指令做相应的规避机动,因此 3 架无人机的推力略有差别。

5 总结与展望

本文使用图论建立了一种线性化无人机编队模型,提出一种三维空间内无人机编队协同控制避障算法,在满足建立模型和仿真假设的条件下,通过仿真实验证明了所提算法的收敛性和有效性。该算法将三维空间复杂避障问题简化为水平面的避障控制和垂直方向控制,在垂直方向无人机编队中的任意两架无人机之间的相对高度小于安全避障区域高度,采用规避机动方式避障,在水平面采用人工势场方法避障。本文只是理论上的研究,并没有进行实体实验,而实体实验涉及大量不可控因素,因此将该算法植入编队控制器当中应用于工程实践,是下一步主攻研究课题。

参考文献:

- [1] ZHU C, LIANG X, HE L, et al. Demonstration and verification system for UAV formation control [C]// IEEE International Conference on Control Science and Systems Engineering. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2017: 56-60.
- [2] HSU C C, HOU R Y, WANG W Y. Path planning for mobile robots based on improved ant colony optimization [C]// IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2014: 2777-2782.
- [3] HAN S C, BANG H, YOO C S. Proportional navigation-based collision avoidance for UAVs [J]. International Journal of Control Automation & Systems, 2009, 7(4): 553-565.
- [4] JIE L, YAN Q D, YUE M A, et al. Global path planning based on improved ant colony optimization algorithm for geometry [J]. Journal of Northeastern University, 2015, 36(7): 923-928.
- [5] SEO J, KIM Y, KIM S, et al. Consensus-based reconfigurable controller design for unmanned aerial vehicle formation flight [J]. Journal of Aerospace Engineering, 2012, 226(7): 817-829.
- [6] YANG A, NAEEM W, FEI M. Decentralised formation control and stability analysis for multi-vehicle cooperative manoeuvre [J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2016, 1(1): 92-100.
- [7] GARCIA E, CASBEER D W. Cooperative task allocation for unmanned vehicles with communication delays and conflict resolution [J]. Journal of Aerospace Computing Information & Communication, 2015, 13(2): 1-13.
- [8] WILLIAMS G, WAGENER N, GOLDFAIN B, et al. Information theoretic MPC for model-based reinforcement learning [C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2017: 1714-1721.
- [9] ZAVLANOS M M, PAPPAS G J. Potential fields for maintaining connectivity of mobile networks [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2007, 23(4): 812-816.
- [10] ATINC G M, STIPANOVIC D M, VOULGARIS P G, et al. Collision-free trajectory tracking while preserving connectivity in unicycle multi-agent systems [C]// American Control Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2013: 5392-5397.
- [11] KURIKI Y, NAMERIKAWA T. Control of formation configuration using leader-follower structure [J]. JSDD, 2013, 7(3): 254-264.
- [12] 张先迪, 李正良. 图论及其应用 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2005: 18-20.
- [13] KURIKI Y, NAMERIKAWA T. Control of formation configuration using leader-follower structure [J]. JSDD, 2013, 7(3): 254-264.
- [14] 郭伟强. 基于一致性理论的无人机编队控制器设计 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013: 16-19.
- [15] KURIKI Y, NAMERIKAWA T. Formation control of UAVs with a fourth-order flight dynamics [C]// Decision and Control. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2014: 6706-6711.
- [16] LI Guifang, CHEN Ye-hwa. Adaptive robust control for stochastic nonlinear systems with matched conditions [C]// 36th Chinese Control Conference. Dalian, China: Dalian University of Technology Press, 2017: 1844-1849.

(编辑 荆树蓉)