

三架固定翼无人机协同编队飞行避障策略*

张佳龙¹, 闫建国¹, 张普¹, 吕茂隆²

(1. 西北工业大学自动化学院, 陕西西安 710129;

2. 空军工程大学装备管理与安全工程学院, 陕西西安 710051)

摘要:针对无人机编队执行空战任务过程中存在无人机之间以及无人机与障碍物发生碰撞的问题,提出单向网络连接结构的多无人机避障算法和基于人工势场的控制方法,同时应用于无人机编队避障控制。以三架无人机构成的正三角形编队作为控制体,同时以长机的运动轨迹作为期望路径,长机提供僚机飞行信息,僚机接受信息保持编队飞行。多无人机编队发现障碍物到避障完成的过程包括编队集结、松散队形、最终恢复集结正三角形编队。仿真实验结果表明,所提避障控制策略能够确保编队收敛于期望的队形和稳定飞行状态。

关键词:单向网络连接;无人机编队系统;人工势场;避障策略;稳定飞行

中图分类号:TP237 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2019)01-123-07

Collision avoidance strategy of three fixed-wing unmanned aerial vehicles cooperative formation flight

ZHANG Jialong¹, YAN Jianguo¹, ZHANG Pu¹, LYU Maolong²

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

2. Equipment Management & Safety Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: Aiming at the process of executing combat mission, the collision may occur between the UAVs (unmanned aerial vehicles), or between the UAV and the enemy plane. A collision avoidance control algorithm and a control strategy based on the artificial potential field were simultaneously applied for a Multi-UAV collision avoidance control. The three UAVs constituted the triangular formation as the control object, the leader flight path as the expected path, the followers tracked the leader to maintain the triangle formation flight. From the UAV formation encountering the obstacle to the UAV formation system accomplishing the avoidance, the UVA formation experienced three stages, including the merging formation, the splitting formation and the closing rank to the triangle formation, which is the convergence to the steady flight state. The simulation results show that the proposed collision control avoidance strategy can converge to the desired formation and the stability-flight state.

Keywords: unidirectional network connection; unmanned aerial vehicle formation system; artificial potential field; collision avoidance strategy; flight-stability

多无人机编队技术,已成为目前智能控制研究领域的热点专题之一^[1],尤其在航迹规划^[2-4]、多无人机编队协同控制^[5-7]以及避障等方面的研究,取得了一些成果,且部分应用于工程实践,但大部分仅限理论研究。

多无人机避障主要有两种算法——规则算法和优化算法。规则算法的基础理论是试场法^[8-11];优化算法是采用模型预测控制(Model Predictive Control, MPC)^[12]。无人机编队控制主要应用分布式控制方法^[13-16],能够实现多层次避障。而多智能体协同控制,同样采用分布式控制

方法来解决^[17-19],这可以简化问题的研究程度。例如,无人机系统动力学模型分别在水平面简化成四阶系统,在垂直方向简化成二阶系统^[20]。很多研究者致力于将算法应用于实际无人机编队中,例如 Goss 等思考三维空间的避障问题,提出一种几何学避障锥方法,设计导引控制律^[21]。

以上文献中,尽管在避障过程提出较多的算法,也实现了避障的目的,但所提出的算法为单一的算法。本文采用以人工势场方法为机理提出的一种新算法,即几何方法(任意两架无人机之间的相对距离以及无人机与障碍物之间的距离大于

* 收稿日期:2018-03-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60974146,61473229)

作者简介:张佳龙(1990—),男,陕西杨陵人,博士研究生,E-mail:zjl0117@mail.nwpu.edu.cn;

闫建国(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:18392005957@163.com

安全距离),同时将所提避障算法和基于人工势场的控制方法同时应用到编队中,能够实现良好的避障目的。本文利用图论理论,建立三机编队模型并进行简化处理,主要突出控制算法在无人机协同编队避障控制方面的优势(研究的三架无人机可以满足最小刚性,同时以三架无人机的研究推广到多架无人机)^[22]。本文基于人工势场的理论,提出一致性控制策略,并将其应用于多无人机编队避障,能够有效解决无人机之间和无人机编队与障碍物的碰撞。

1 问题描述

多无人机协同编队执行空战任务,当遇到前方敌机实施精确打击时,除了避免无人机之间发生碰撞,还要避开障碍物(敌机)。这一部分主要是建立三机编队模型和定义控制目标。

假设有 $N(N=3)$ 架无人机,即 $N-1$ 架僚机和 1 架长机组成的多无人机编队系统。该编队系统之间的通信是单向的,即僚机之间的通信以及僚机与长机之间的通信共同构成一个网络拓扑结构。为了简化无人机的数学模型,有以下四点假设:①长机发出指令到僚机接受指令并做出相应机动过程时间较短,可以忽略;②无人机编队飞行速度较慢,忽略外界的气动力矩,例如阻力力矩和作用机体翼展表面的涡旋效应;③无人机编队保持队形飞行时,每架无人机视为刚体,以质点处理;④在无人机协同编队飞行过程中,忽略环境中侧风的影响。三架无人机组成的编队系统的网络拓扑结构关系如图 1 所示。

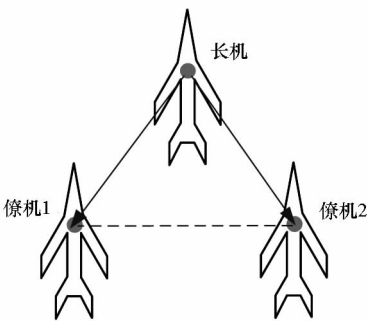


图 1 无人机编队网络拓扑关系图

Fig. 1 UAV formation system of the network topology

为了用数学化语言描述该网络拓扑结构的模型,使用图论理论^[23]。使用图 $G=(V,A)$ 建立 N 架无人机之间的信息传递,这里的 $V=\{v_1, v_2, v_3, \dots, v_N\}$ 表示有序点集, $A \in V \times V$ 表示有序边集。图中的边 (v_i, v_j) 表示无人机 i 能够直接把信息传递给无人机 j 的有向路径,即无人机 j 能够直

接获取并使用无人机 i 的信息。有向图 G 的生成树指除根节点外,其他节点有且只有一个父节点的子图。在有向图中,根节点不能反向与父节点相连,可以与其他节点直接相连;然而在无向图中,边 (v_i, v_j) 表示无人机 i 与无人机 j 都能从对方获取信息,即 (v_i, v_j) 和 (v_j, v_i) 是一样的。

令 $A \in \mathbf{R}^{N \times N}$, $D \in \mathbf{R}^{N \times N}$ 以及 $L \in \mathbf{R}^{N \times N}$ 分别为邻接矩阵、度矩阵和拉普拉斯矩阵。在图论中,邻接矩阵是表示图中各节点之间关系的矩阵,根据图论知识,邻接矩阵 $A=[a_{ij}]$ 表示为:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & (v_i, v_j) \in A \\ 0, & (v_i, v_j) \notin A \end{cases} \quad (1)$$

式(1)说明,在图形拓扑关系中,当无人机 i 直接从无人机 j 获取信息时 $a_{ij}=1$,反之 $a_{ij}=0$ 。

度矩阵 D 表示为:

$$D = \text{diag}(deg(v_1), deg(v_2), \dots, deg(v_N)) \quad (2)$$

式中, $deg(v_i)$ 为 v_i 节点与其他节点的通信数总和。

拉普拉斯矩阵^[24]被定义为:

$$L = [l_{ij}] \in \mathbf{R}^{N \times N}, \quad l_{ij} = \sum_{i \neq j} a_{ij} \quad (3)$$

由式(3)可知,矩阵 L 具有以下性质:

$$1) l_{ij} < 0, i \neq j$$

$$\sum_{j=1}^n l_{ij} = 0, i = 1, 2, \dots, n$$

$\mathbf{1}_n$ 表示元素都为 1 的 $n \times 1$ 维列向量, $\mathbf{0}_n$ 表示所有元素都为 0 的 $n \times 1$ 维列向量。根据拉普拉斯矩阵的定义有如下等式成立: $L\mathbf{1}_n = \mathbf{0}_n$ ^[25]。

2) $L=D-A$, 如果一个图 G 有或者包含一个生成树,则拉普拉斯矩阵 L 的特征值由一个零特征值和非零正实数组成。

2 避障研究

2.1 基于人工势场避障方法

基于上述三架无人机模型,此处选择任意一架僚机(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为图 2。图中长机为圆心, r 为半径, Δh 为高度,且 h, r 分别为在垂直方向僚机和长机的相对高度以及在水平方向两者之间的相对距离,它们有以下关系^[22]:

$$\begin{cases} r_r = |r_1 - r_f| \\ h_a = \sqrt{(h_1 - h_f)^2} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} h_r = |h_1 - h_f| \\ r_a = \sqrt{(x_1 - x_f)^2 + (y_1 - y_f)^2} \end{cases} \quad (5)$$

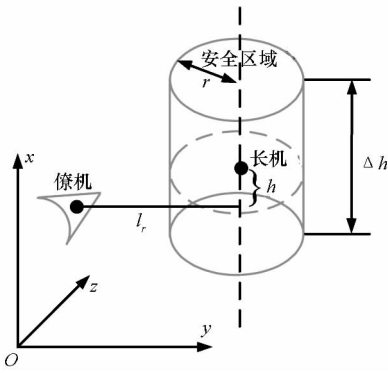


图2 编队飞行避障示意图

Fig.2 Formation flight collision avoidance diagram

其中,下标 r 、 l 和 a 分别表示在机体坐标系下的距离、长机、僚机以及在惯性坐标系下的距离。

定义僚机与长机之间的人工势场为:

$$U_r = \begin{cases} \frac{k_h}{2} \left(\frac{1}{|h_r|+1} - \frac{1}{\Delta h+1} \right)^2, & |h_r| \leq \Delta h \text{ 且 } |l_r| \leq 2r \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

其中, $k_h \in \mathbf{R}$ 是一个正实数的增益。

由式(6)可得,僚机与长机之间的平均势场可表示为:

$$U_i = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1, j \neq i}^N U_{ij}, \quad i \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (7)$$

由式(7)可得,多无人机编队中,每架无人机产生的人工势场总和为:

$$U_c = \sum_{i=1}^N U_i \quad (8)$$

针对该三机编队系统,人工势场总和为:

$$U_t = U_1 + U_2 + U_3 \quad (9)$$

式中, $U_1 = (U_{12} + U_{13})/2$, $U_2 = (U_{21} + U_{23})/2$, $U_3 = (U_{31} + U_{32})/2$ 。

为防止僚机与长机发生碰撞,提出人工势场力:

$$f_{ca_i} = -\nabla h U_c, \quad i \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (10)$$

上式没有局部极小值,由于重叠区域内复合场仅由斥力场组成^[22],它的矢量如式(11)所示。

$$f_{ca} = -\nabla U_c = - \left[\frac{\partial U_c}{\partial U_1}, \frac{\partial U_c}{\partial U_2}, \dots, \frac{\partial U_c}{\partial U_N} \right] \quad (11)$$

人工势场力使得任意两无人机在横向和纵向距离增大,有效防止碰撞^[22]。

2.2 避障控制方案设计

三机编队飞行过程遇到的障碍物分两类:静止障碍物和运动障碍物。以下分两种情况进行控制方案的设计。在本节中,以研究水平方向为主,由于垂直方向研究和水平方向研究类似,在此不

再赘述。一般情况下,障碍物形状不是规则的几何图形,为了便于研究,将障碍物区域用圆柱体外表面包络住,简化为圆柱体模型,如图3所示。其中,包络线与圆柱体外表面相切, r_0 为障碍物区域的横截面半径, o 为障碍物中心点。

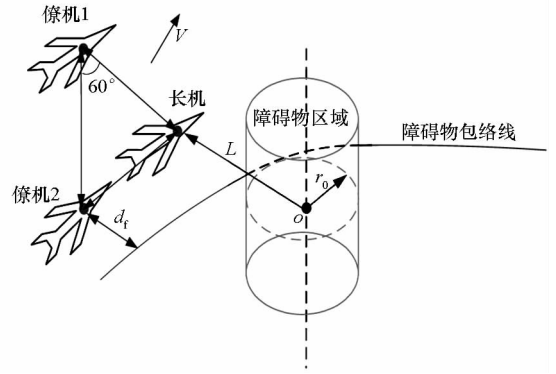


图3 障碍物静止时无人机避障示意图

Fig.3 Avoidance diagram of the UAV formation system with the obstacle of static state

2.2.1 障碍物是静止的

三架无人机构成的正三角形编队系统,在水平面以相同前进速度飞行,且他们之间的相对高度差为零,长机和靠近障碍物内侧的僚机在三角形队形的一条边上,它与包络线是平行关系,而且也是长机期望的路径。由于编队队形固定,确保两条曲线之间的相对距离大于零,才能安全避障。

引理1 如果三架无人机能够成功地避开障碍物,则满足:

$$\begin{cases} L - r_0 \geq \xi \\ d_f - r_0 \geq 0 \end{cases} \quad (12)$$

其中, ξ 为 r_0 邻域很小的正实数, L 为长机与障碍物几何中心 o 的距离, d_f 为僚机2运动轨迹与圆柱切线之间的距离。

2.2.2 障碍物是运动的

假定多无人机编队系统执行一次空中打击任务,前方敌机作为运动目标,即障碍物,战机在精确打击的同时,还需避开障碍物。多机编队构成的正三角形编队系统,在三维空间以相同的前行速度按照地面指挥部设定的预期轨迹飞行,即长机的飞行轨迹。当编队期望的飞行轨迹和障碍物的包络线保持动态平行关系时,才能确保无人机编队成功避障,完成作战任务,如图4所示。

引理2 如果多无人机编队系统避开运动的障碍物,则满足:

$$\begin{cases} d - r_0 \geq \zeta \\ \bar{L}_1 // \bar{L}_2 \end{cases} \quad (13)$$

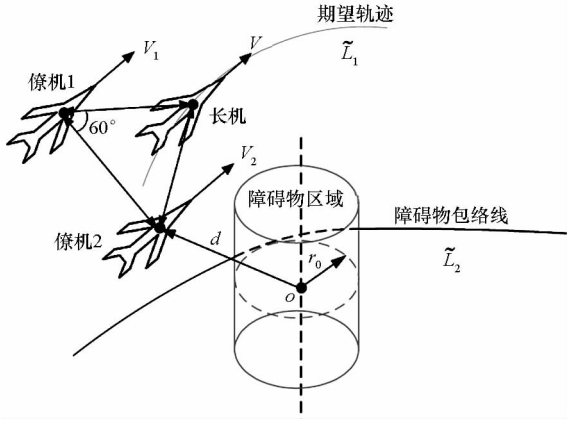


图 4 障碍物运动时无人机避障示意图

Fig. 4 Avoidance diagram of the UAV formation system with the obstacle of motional state

其中, ζ 为 r_0 邻域的正实数, \bar{L}_1 和 \bar{L}_2 分别表示无人机编队期望轨迹以及障碍物的包络线。

针对多目标(三架无人机)编队系统, 基于“长机-僚机”控制策略提出两种避障方案: 一种为障碍物静止, 这种避障方法比较简单, 在长机控制器植入控制算法, 长机与障碍物保持安全距离, 僚机根据设定编队指令追踪长机构成正三角形队形飞行, 可以有效避免碰撞; 另一种为障碍物运动, 由于多无人机编队和障碍物都是运动的, 这种控制方案实现起来比较困难, 但这种避障控制方案, 为一致性算法实现避障提供理论指导。

3 无人机之间的防碰撞算法研究

无人机编队中, 无人机 i 的控制律^[26] 表示为:

$$\bar{T}_{total_i}(t) = - \sum_{j=1}^{N+1} a_{ij} \left[\sum_{k=0}^1 \gamma_k (\hat{h}_i^{(k)} - \hat{h}_j^{(k)}) \right], \quad i \in \{1, 2, \dots, N+1\} \quad (14)$$

$$\hat{h}_j^{(k)} = h_j^{(k)} - h_{h_j}^{(k)}, \quad j \in \{1, 2, \dots, N+1\}, \quad k \in \{0, 1\} \quad (15)$$

其中: 符号下标 $N+1$ 表示长机, $\gamma_k \in \mathbf{R} (k \in \{0, 1\})$ 为正实数控制增益; $h_j^{(k)} \in \mathbf{R} (k \in \{0, 1\})$ 表示无人机 j 在垂直方向的状态; $h_{h_j}^{(k)} \in \mathbf{R} (k \in \{0, 1\})$ 表示在垂直方向无人机 j 与长机预期的相对状态^[22]。正如式(1)所定义, a_{ij} 表示无人机 i 和无人机 j 之间是否有信息获取, 即当 $a_{ij} = 1$ 表示两无人机之间有信息交互, $a_{ij} = 0$ 表示两无人机之间没有信息交互。

对于所提出的无人机编队避障控制算法, 其避障能力如式(16)所示。

$$\bar{T}_i = f_{from_i} + f_{ca_i}, \quad i \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (16)$$

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

引理 3 假设多无人机编队系统是由一架长机和 $N(N \geq 2)$ 架僚机构成的线性化模型, 且满足假设①和②^[22]。控制算法, 即式(14)中 γ_k 为正的增益, 且 $k \in \{0, 1\}$, 同时式(6)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:

$$\dot{h}_i^{(1)} = - \sum_{j=1}^{N+1} a_{ij} \left[\sum_{k=0}^1 \gamma_k (\hat{h}_i^{(k)} - \hat{h}_j^{(k)}) \right] + f_{ca_i}, \quad i \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (17)$$

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 $\bar{f}_{ca} = [f_{ca}^T \ 0]^T \in \mathbf{R}^{N+1}$ 。此处使用新定义符号, 将式(17)写成矩阵的形式, 其表达式为:

$$\dot{\hat{h}}^{(1)} = -\gamma_0 \mathbf{L} \hat{h}^{(0)} - \gamma_1 \mathbf{L} \hat{h}^{(1)} + \bar{f}_{ca} \quad (18)$$

式中, $\mathbf{L} \in \mathbf{R}^{(N+1) \times (N+1)}$ 是多无人机编队系统图论中的拉普拉斯矩阵。此处 $N+1$ 表示无人机编队中的长机, 同时状态矢量 $\hat{h}^{(k)}$ 是由无人机的状态矢量和来自长机的指令构成^[22]。对拉普拉斯矩阵 \mathbf{L} 的任意一行进行研究, 如式(19)所示:

$$\begin{cases} a_i(N+1) = \sum_{j=1}^{N+1} a_{ij} - a_{i1} - a_{i2} - \dots - a_{iN} \\ a_{ii} = 0, \quad i \in \{1, 2, \dots, N\} \end{cases} \quad (19)$$

根据已知 $d_{N+1}^{(k)} = 0, k \in \{0, 1\}$ 以及式(19), 式(18)表示为:

$$\dot{\hat{h}}^{(1)} = -\gamma_0 \mathbf{M} \hat{h}^{(0)} - \gamma_0 \mathbf{M} \hat{h}^{(1)} + \gamma_0 \mathbf{M} \bar{h}_{N+1}^{(0)} + \gamma_1 \mathbf{M} \bar{h}_{N+1}^{(0)} + \gamma_0 \mathbf{M} d_h^{(0)} + \gamma_0 \mathbf{M} d_h^{(1)} + \bar{f}_{ca} \quad (20)$$

其中: 矩阵 $\mathbf{M} \in \mathbf{R}^{N \times N}, \mathbf{h}^{(k)} = [h_1^{(k)}, h_2^{(k)}, \dots, h_N^{(k)}]^T, \bar{h}_{N+1}^{(k)} = \mathbf{1}_N \otimes h_{N+1}^{(k)} \in \mathbf{R}^N, \otimes$ 表示克罗内克积符号以及 $\mathbf{1}_N = [1, 1, \dots, 1]^T \in \mathbf{R}^N$ 。此处 \mathbf{M} 矩阵和 \mathbf{L} 矩阵相似, 但它们不相等。

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^{N+1} a_{1j} & -a_{12} & \dots & a_{1N} \\ a_{21} & \sum_{j=1}^{N+1} a_{2j} & \dots & a_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{Nj} & a_{Nj} & \dots & \sum_{j=1}^{N+1} a_{Nj} \end{bmatrix} \quad (21)$$

已知 \mathbf{M} 矩阵, 方程(17)可以简化成矩阵的形式:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \mathbf{h}^{(0)} \\ \mathbf{h}^{(1)} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \mathbf{0}_N & \mathbf{I}_N \\ -\gamma_0 \mathbf{M} & -\gamma_1 \mathbf{M} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{h}^{(0)} \\ \mathbf{h}^{(1)} \end{bmatrix} + \\ &\begin{bmatrix} \mathbf{0}_N & \mathbf{I}_N \\ \gamma_0 \mathbf{M} & \gamma_1 \mathbf{M} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{h}}_{N+1}^{(0)} \\ \bar{\mathbf{h}}_{N+1}^{(1)} \end{bmatrix} + \\ &\begin{bmatrix} \mathbf{0}_N & \mathbf{I}_N \\ \gamma_0 \mathbf{M} & \gamma_1 \mathbf{M} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{d}_h^{(0)} \\ \mathbf{d}_h^{(1)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0}_N \\ \mathbf{f}_{ca} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (22)$$

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。

为了验证方程(22)的稳定性,求解微分方程(22),通过解的特征,研究其稳定性。求解方程(22)对应的齐次微分方程的解,它的齐次微分方程表示:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \mathbf{h}^{(0)} \\ \mathbf{h}^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_N & \mathbf{I}_N \\ -\gamma_0 \mathbf{M} & -\gamma_1 \mathbf{M} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{h}^{(0)} \\ \mathbf{h}^{(1)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0}_N \\ \mathbf{f}_{ca} \end{bmatrix} \quad (23)$$

此处,构建李雅普洛夫函数 V ,它是由多无人机(三无人机)编队系统总能量构成。

其表达式如式(24)所示。

$$V = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{h}}^T \dot{\mathbf{h}} + \frac{1}{2} \gamma_0 \mathbf{h}^T \mathbf{M} \mathbf{h} + U_c \quad (24)$$

对李雅普洛夫函数 V 对时间求导,可得式(25)。

$$\dot{V} = \dot{\mathbf{h}}^T (\ddot{\mathbf{h}} + \gamma_0 \mathbf{M} \dot{\mathbf{h}}) + \dot{U}_c = -\gamma_1 \dot{\mathbf{h}}^T \mathbf{M} \dot{\mathbf{h}} + \dot{\mathbf{h}}^T \mathbf{f}_{ca} + \dot{U}_c \quad (25)$$

由式(15),可得式(26)。

$$\dot{U}_c = \dot{\mathbf{h}}^T \nabla U_c = -\gamma_1 \dot{\mathbf{h}}^T \mathbf{f}_{ca} \quad (26)$$

综合式(25)和式(26),可得:

$$\dot{V} = -\gamma_1 \dot{\mathbf{h}}^T \mathbf{M} \dot{\mathbf{h}} \quad (27)$$

当两架无人机之间的安全区域没有重叠情形时,微分方程(22)的特解可以表示:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{h}^{(0)} \\ \mathbf{h}^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{h}}_{N+1}^{(0)} \\ \bar{\mathbf{h}}_{N+1}^{(1)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{d}_h^{(0)} \\ \mathbf{d}_h^{(1)} \end{bmatrix} \quad (28)$$

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 $\bar{\mathbf{h}}_{N+1}^{(2)} = \mathbf{0}$, $\mathbf{d}_h^{(2)} = \mathbf{0}$,它们分别表示长机和僚机的预期输入指令。

综上所述,微分方程(28)的通解等于它对应的齐次方程的通解加上本身的特解。因此,当控制增益 γ_k ($k \in \{0, 1\}$) 和人工势场表达式中的 k_h 选择合适的正值时,方程(28)渐进收敛于^[22]:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{h}^{(0)} \\ \mathbf{h}^{(1)} \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{h}}_{N+1}^{(0)} \\ \bar{\mathbf{h}}_{N+1}^{(1)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{d}_h^{(0)} \\ \mathbf{d}_h^{(1)} \end{bmatrix}, t \rightarrow \infty \quad (29)$$

这是来自长机指令的收敛结果,根据式(21)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。

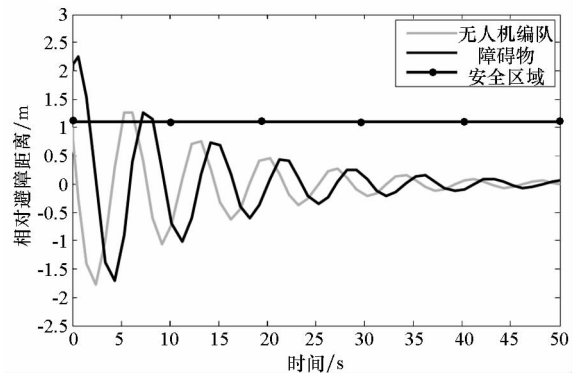
4 仿真实验及分析

4.1 初始条件设置

长机相对于地面以恒定高度 600 m 飞行,两架僚机与长机之间保持确定的相对高度 1.2 m,相对稳定高度差为零,长机提供给僚机的期望相对高度 $d_{h_i} = 0$ m, $\forall i \in \{1, 2\}$ 。其余初值分别为 $V_r = 56$ m/s, $M = 90$ kg, $q = 10^\circ/\text{s}$, $r = 10^\circ/\text{s}$, $\gamma_0 = 1.5$, $\gamma_1 = 3$, $k_h = 5.5$, $\Delta H = 3$ m, $\Delta R = 3.5$ m^[22], $\Delta H = 1.2$ m, $\Delta L = 1.2$ m, $\Delta L_R = 20$ m。

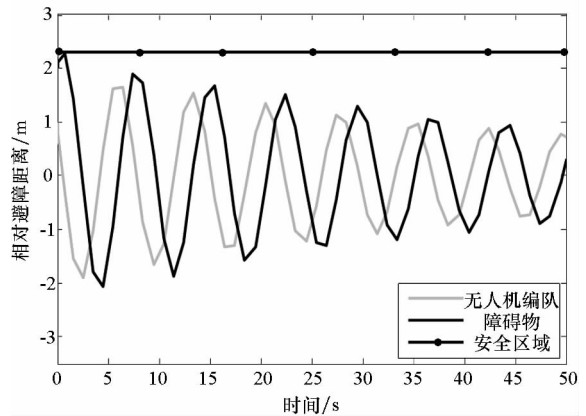
4.2 实验结果

基于仿真的初始条件和假设,三架无人机编队避障仿真如图 5 和图 6 所示。其中,图(a)与图(b)分别代表未加入避障算法和加入避障算法的仿真图。



(a) 未加入避障算法时间响应

(a) Time response without collision avoidance algorithm

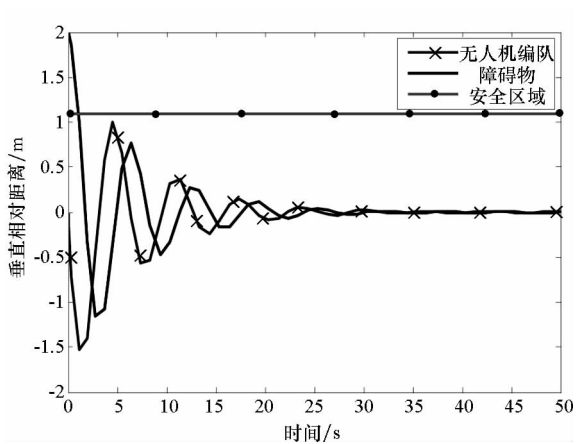


(b) 加入避障算法时间响应

(b) Time response with collision avoidance algorithm

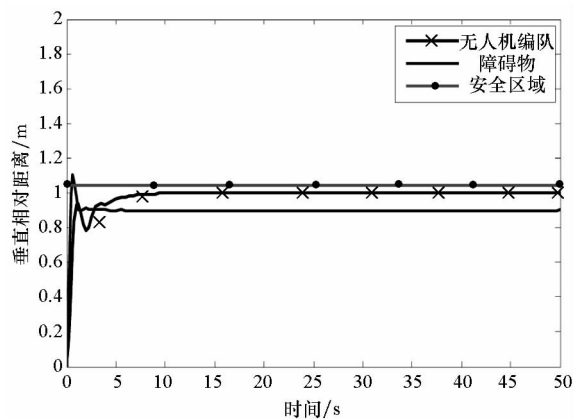
图5 无人机编队与障碍物之间的相对避障距离
Fig. 5 Relative the collision avoidance distance of between the UAV formation system and the obstacle

由图 5 可知:在图 5(a)中,无人机编队与障碍物之间设定的预期相对安全距离为 1.2 m,障



(a) 未加入避障算法时间响应

(a) Time response without collision avoidance algorithm



(b) 加入避障算法时间响应

(b) Time response with collision avoidance algorithm

图 6 无人机编队垂直方向相对距离

Fig. 6 Vertical relative distance of the UAV formation system

障碍物在前,无人机编队在其后,随着仿真的进行,它们之间的相对避障距离小于预设值,曲线呈现一种振荡收敛趋势,最终它们之间的相对避障距离收敛于零,此时是最容易发生碰撞。在图 5(b)中,加入避障控制算法后,无人机编队与障碍之间的安全距离增加到 2.3 m,且它们之间的相对避障安全距离保持 1.2 m 不变,同时无人机仍保持编队队形不变,障碍物保持恒定的前进方向和速度。加入避障控制算法,能够有效避免碰撞,实现避障的目的。

由图 6 可知:在图 6(a)中,在垂直方向,障碍物与无人机编队的安全距离为 1.1 m,保持不变;障碍物和无人机编队曲线呈现一种振荡衰减趋势,最终收敛于零。假设在水平方向,无人机编队和障碍物之间的避障区域有重叠,一旦在垂直方向相对距离为零,极易发生碰撞,图 6(b)加入避障控制算法,有效防止碰撞发生。根据式(29),

当仿真时间足够长,垂直方向的距离收敛于稳定的“正常值”,即在图 6(b)中,无人机编队与障碍物和所设定的安全距离之间保持不等的恒定距离,有效避免碰撞。

5 总结

本文基于人工势场方法,提出一种无人机编队避障控制策略,通过将加入控制算法和未加入控制算法进行对比,验证了所提控制策略的有效性。但是本研究工作仅是无人机编队避障及航迹规划技术研究的一小部分,在实际工程中,还应考虑协同控制律设计、涡旋效应和任务分配等,这是下一步研究工作的重点。

参考文献 (References)

- [1] Bansal S, Chen M, Fisac J F, et al. Safe sequential path planning of multi-vehicle systems under presence of disturbances and imperfect information [C]//Proceedings of American Control Conference, 2017.
- [2] Wang B H, Chen W S, Dai H, et al. Optimal adaptive tracking consensus for multi-vehicle systems with periodic sampling [C]//Proceedings of Chinese Automation Congress, 2017: 3901 - 3906.
- [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] Bollino K, Lewis L R. Collision-free multi-UAV optimal path planning and cooperative control for tactical applications [C]//Proceedings of AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit, 2008.
- [5] Seo J, Kim Y, Kim S, et al. Consensus-based reconfigurable controller design for unmanned aerial vehicle formation flight [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part G 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, 2013, 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, 2016, 13(2): 1 - 13.
- [8] Zavlanos M M, Pappas G J. Potential fields for maintaining connectivity of mobile networks [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2007, 23(4): 812 - 816.
- [9] Atınc G M, Stipanovic D M, Voulgaris P G, et al. Collision-free trajectory tracking while preserving connectivity in unicycle multi-agent systems [C]//Proceedings of American Control Conference, 2013: 5392 - 5397.
- [10] 甄然, 甄士博, 吴学礼. 一种自适应控制的人工势场的无人机路径规划算法 [J]. 无线电工程, 2017, 47(5): 54 - 57.
ZHEN Ran, ZHEN Shibo, WU Xueli. Improved artificial potential field method for UAV path planning [J]. Radio Engineering, 2017, 47(5): 54 - 57. (in Chinese)

- [11] 朱旭, 闫茂德, 张昌利, 等. 基于改进人工势场的无人机编队防碰撞控制方法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2017, 38(6): 961-968.
ZHU Xu, YAN Maode, ZHANG Changli, et al. UAV formation collision avoidance control method based on improved artificial potential field [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2017, 38(6): 961-968. (in Chinese)
- [12] Richards A, How J. Decentralized model predictive control of cooperating UAVs[C]//Proceedings of IEEE Conference on Decision and Control, 2004: 4286-4291.
- [13] Olfati-Saber R, Fax J A, Murray R M. Consensus and cooperation in networked multi-agent systems [J]. Proceedings of the IEEE, 2007, 95(1): 215-233.
- [14] Wei R, Sorensen N. Distributed coordination architecture for multi-robot formation control [J]. Robotics & Autonomous Systems, 2008, 56(4): 324-333.
- [15] Ren W. Consensus tracking under directed interaction topologies: algorithms and experiments [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2009, 18(1): 230-237.
- [16] Meng Z Y, Ren W, Cao Y C, et al. Leaderless and leader-following consensus with communication and input delays under a directed network topology[J]. IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics Part B Cybernetics, 2011, 41(1): 75-88.
- [17] Yoshioka C, Namerikawa T. Observer-based consensus control strategy for multi-agent system with communication time delay[C]// Proceedings of IEEE International Conference on Control Applications, 2008: 1037-1042.
- [18] Kawakami H, Namerikawa T. Cooperative target-capturing strategy for multi-vehicle systems with dynamic network topology[C]//Proceedings of American Control Conference, 2009: 635-640.
- [19] Kuriki Y, Namerikawa T. Formation control of UAVs with a fourth-order flight dynamics [C]//Proceedings of 52nd IEEE Conference on Decision and Control, 2014: 6706-6711.
- [20] Kuriki Y, Namerikawa T. Consensus-based cooperative formation control with collision avoidance for a multi-UAV system [C]//Proceedings of American Control Conference, 2014: 2077-2082.
- [21] Goss J, Rajvanshi R, Subbarao K. Aircraft conflict detection and resolution using mixed geometric and collision cone approaches [C]//Proceedings of AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, 2004.
- [22] 张佳龙, 闫建国, 张普, 等. 基于一致性算法的无人机协同编队避障研究[J]. 西安交通大学学报, 2018(9): 168-174.
ZHANG Jialong, YAN Jianguo, ZHANG Pu, et al. Collision avoidance of unmanned aerial vehicle formation based on consensus control algorithm [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018(9): 168-174. (in Chinese)
- [23] 张先迪, 李正良. 图论及其应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005.
ZHANG Xiandi, LI Zhengliang. Graph theory and its application [M]. Beijing: Higher Education Press, 2005. (in Chinese)
- [24] Royle G, Godsil C. Algebraic graph theory [M]. USA: Springer, 2001: 55-58.
- [25] 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.
GUO Weiqiang. The controller design of the UAV formation based on consensus protocols [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese)
- [26] Kuriki Y, Namerikawa T. Formation control of UAVs with a fourth-order flight dynamics [C]//Proceedings of 52nd IEEE Conference on Decision and Control, 2014: 6706-6711.