

DOI: 10.7652/xjtuxb201811017

基于改进人工势场的无人机编队避障控制研究

张佳龙¹, 闫建国¹, 张普², 王奔驰³

(1. 西北工业大学自动化学院, 710129, 西安; 2. 陕西服装工程学院经济管理学院, 712046, 西安;

3. 空军工程大学航空工程学院, 710038, 西安)

摘要: 针对人工势场方法在无人机避障过程中存在局部最小值的问题, 基于虚拟结构和“长机-僚机”控制策略, 提出一种复合矢量人工势场方法, 有效实现了无人机编队在三维空间避开障碍物追踪运动目标的目的。该方法以 3 架无人机构成的编队作为研究对象, 虚拟长机运动轨迹作为期望路径, 障碍物简化为圆柱体, 其周围的人工势场近似为球体表面。人工势场中的引力导引虚拟长机追踪目标, 僚机追踪长机保持编队飞行。斥力作用使得编队避开障碍物, 同时僚机不分次序和具体位置均匀地分布在以虚拟长机为球心的球体表面。无人机编队的避障路径取决于两种复合矢量的人工势场, 每架无人机可选择最优路径避障, 避障结束重组三角形编队飞行。通过仿真结果验证了该理论的可行性, 为多无人机编队避障提供了一种思路。

关键词: 人工势场方法; 局部最小值; 虚拟长机; 最优路径; 无人机编队避障

中图分类号: TP237 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2018)11-0112-08

Study on the Collision Avoidance of UAV Cooperative Formation with Improved Artificial Potential Field

ZHANG Jialong¹, YAN Jianguo¹, ZHANG Pu², WANG Benchu³

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

2. School of Economic Management, Shaanxi Fashion Engineering University, Xi'an 712046, China;

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

Abstract: Aiming at the problem that there exists local minima in the collision avoidance process for the UAVs using artificial potential field, a composite vector artificial potential field in three-dimensional space is proposed based on the virtual structure and the “leader-follower” control strategy, which can effectively avoid the obstacle and track the moving target. Three UAVs constituting the regular triangular formation are taken as the control object, the virtual leader flight path as expected path, and the obstacle is simplified as a cylinder that the artificial potential field around them is approximately a spherical surface. The attractive control force of the artificial potential field can guide the virtual leader to track the target. At the same time, the followers track the leader to keep the formation flight. The repulsive force can affect the collision avoidance between the UAVs, and arrange the followers evenly distributed on the spherical surface. Moreover, the follower's specific orders and positions are not required. The collision avoidance path of the UAV formation depends on the artificial potential field with two composite vectors. Every UAV may choose an optimal path to avoid the obstacle and reconfigure the regular triangle formation flight after passing the obstacle. The simulation experiments verify the validity and

收稿日期: 2018-04-23。 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: 2018-07-05

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20180705.1612.002.html>

feasibility of the proposed collision avoidance control algorithm and provide an idea for the collision avoidance of multi-UAV formation.

Keywords: artificial potential field method; local minima; virtual leader; optimal path; UAV formation obstacle avoidance

随着计算机、传感器以及通信技术的快速发展,多机编队系统在三维空间的控制已经成为广泛研究的课题,并具有重要的工程应用价值,包括科学研究、交通运输、地质勘查、执行各种任务等^[1-3]。

在多无人机编队控制中,已提出了很多编队结构、不同的控制策略以及控制算法,这些方法主要有“长机-僚机”法、基于行为法、虚拟结构法以及基于一致性协同编队避障控制算法,每一种控制方法都有自己的优缺点。在“长机-僚机”方法中,任意一架无人机均可作为长机,其余无人机作为僚机,这种控制方法不足之处在于僚机对于长机没有实时的反馈。例如,在文献[4]中,作者提出一种具有分布估计量的分布式控制方案,在三维噪声环境中,僚机只需知道与长机的相对位置,就可实现编队的控制。基于一致性算法的协同编队控制是一种分布式控制方法,具有网络结构灵活性优势^[5-8],可实现多通道复合控制避障。研究多智能体系统协同控制问题,也主要应用一致性算法解决^[9-11],可极大地简化问题的复杂程度。

在研究无人机避障问题中,人工势场方法是普遍应用的算法,因为它简单、实用、工程实践性强。所谓人工势场方法,即无人机与无人机之间被视为相互吸引的球体,当两架无人机靠近时相互吸引;当它们远离时相互排斥,而且之间距离越小斥力越大,使得两架无人机相互远离,直至达到平衡状态。这里的势场法采用梯度势场法,也就是说势场的负梯度作为作用在无人机上的虚拟力,障碍物对无人机产生斥力,长机对两僚机产生引力,僚机之间产生斥力,以至于无人机维持编队形状而且无人机与障碍物避免发生碰撞。当两架无人机和障碍物共线时,其中一架无人机处于平衡位置,无法摆脱平衡状态,此时无人机编队无法绕开障碍物,易发生碰撞。本文采用人工势场的两个方向的矢量场,分别为 x - y 平面和 y - z 平面,无人机编队接近障碍物周围产生椭球形人工势场,两个平面的矢量场会打破这种平衡,使无人机编队以最优的路径避开障碍物。在研究人工势场方法避障的过程中,存在的共性问题是无人机编队、障碍物以及目标之间存在局部最小值,即无人机接近障碍物时,斥力处于无人机运动的反

方向,使其滞留在最小值处,不能到达目标位置^[12-14]。解决办法之一是在垂直方向或者水平方向加入外界干扰打破这种平衡,然而无人机的速度很难保持,尤其在多无人机编队中。近年来,很多学者提出了有关多无人机编队在二维平面跟随和追踪目标以到达目标点的改进的人工势场避障算法^[15-16]。无人机避障算法能够使编队在避障过程中保持良好的稳定性和鲁棒性^[17],例如无人机编队在三维空间以平滑的转弯半径和最优的路径避障,追踪目标到达目标点。同时,一些学者提出无人机协同编队模型预测控制方法,对任意形状的障碍物进行避障策略研究,这对无人机编队的避障理论进行了补充。

多无人机编队系统预估运动目标的轨迹、避开障碍物并完成追踪运动的目标,是一个复杂的过程,也是待解决的核心问题之一。本文针对人工势场方法进行避障易陷于局部最小值的问题(当无人机、目标以及障碍物三者共线时,无人机处于三者中间,受到目标和障碍物的斥力等大反向,此时无人机处于局部最小位置处),提出一种三维空间复合矢量人工势场法应用到无人机编队中,通过采用复合人工势场方法,使无人机编队避障后能够保持无人机在飞行过程中良好的稳定性和鲁棒性。

1 问题描述

本文以 3 架无人机和一架虚拟长机构成的正三角形编队作为控制目标,其中 3 架无人机在三角形的 3 个顶点处作为僚机,虚拟长机在三角形的几何中心。无人机编队中的单机在三维空间的动力学质点模型如下式^[17]所示

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_n &= V_n \cos \alpha_n \cos \beta_n \\ \dot{y}_n &= V_n \cos \alpha_n \sin \beta_n \\ \dot{z}_n &= V_n \sin \alpha_n \\ m_n \dot{V}_n &= T_n - D_n - m_n g \sin \alpha_n \\ \dot{\alpha}_n &= \frac{L_n \cos \delta_n + m_n g \cos \alpha_n}{m_n V_n} \\ \dot{\beta}_n &= \frac{L_n \sin \delta_n}{m_n V_n \cos \alpha_n} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: m_n 是无人机的质量; D_n 是阻力; T_n 是发动机的推力; g 为重力加速度; $(\dot{x}_n, \dot{y}_n, \dot{z}_n)$ 表示无人机在

空间3个坐标轴方向上的速度; L_n 为升力; α_n 表示迎角; β_n 表示航向角; δ_n 表示倾斜角; V_n 表示空速,即无人机相对空气的速度。无人机动力学模型如图1所示。

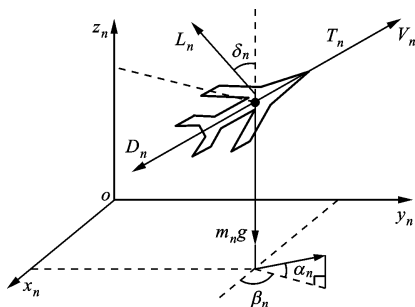


图1 无人机坐标系模型

无人机控制系统包括内环和外环,内环控制系统的输入信号分别为发动机推力、升力以及倾斜角,外环系统将控制信号通过传感器反馈给执行元件做出相应的机动。式(1)通过反馈线性化,得到线性化模型如下

$$\begin{cases} \ddot{x}_n = \mu_x \\ \ddot{y}_n = \mu_y \\ \ddot{z}_n = \mu_z \end{cases} \quad (2)$$

式中 (μ_x, μ_y, μ_z) 是虚拟加速度,作为控制输入。虚拟控制输入信号通过式(2)线性化模型定义,真实控制输入由下式获得

$$\left. \begin{aligned} \delta &= \arctan\left(\frac{\mu_y \cos\beta - \mu_x \sin\beta}{(\mu_z + g) \cos\alpha - (\mu_x \cos\beta + \mu_y \sin\beta) \sin\alpha}\right) \\ L &= m \frac{(\mu_z + g) \cos\alpha - (\mu_x \cos\beta + \mu_y \sin\beta) \sin\alpha}{\cos\delta} \\ T &= m[(\mu_z + g) \sin\alpha - (\mu_x \cos\beta + \mu_y \sin\beta) \cos\alpha] + D \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\tan\beta_n = \dot{y}_n / \dot{x}_n; \sin\alpha_n = \dot{z}_n / V_n$$

2 无人机编队控制

本文以3架无人机和一架虚拟长机构成的编队系统作为控制体,将所提出的改进人工势场算法应用到无人机编队控制中,实现了三维空间避障,其编队模型如图2所示。

2.1 单机模型避障控制算法

无人机编队中每架无人机运动轨迹均是两种矢量的控制力复合作用的结果。复合控制力由两部分组成,如下式所示

$$\mu_n = F_{na} + F_r \quad (4)$$

人工势场的引力 F_{na} 能够保证无人机保持队形,而且控制无人机到达以虚拟长机为球心的球体表

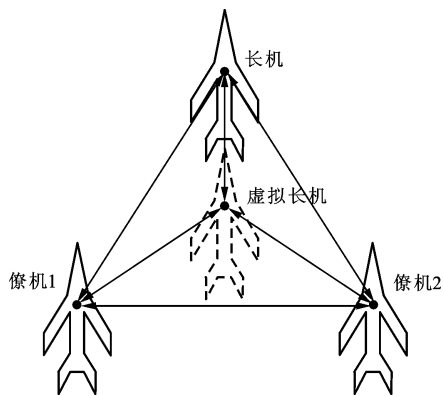


图2 无人机编队控制模型结构

面,可以表示为

$$F_{na} = (F_{xna}, F_{yna}, F_{zna}) \quad (5)$$

其中

$$\left. \begin{aligned} F_{xna} &= -k_s(x_n - x_1) \cdot \left((x_n - x_1)^2 + (y_n - y_1)^2 + (z_n - z_1)^2 - r_a^2 \right) \\ F_{yna} &= -k_s(y_n - y_1) \cdot \left((x_n - x_1)^2 + (y_n - y_1)^2 + (z_n - z_1)^2 - r_a^2 \right) \\ F_{zna} &= -k_s(z_n - z_1) \cdot \left((x_n - x_1)^2 + (y_n - y_1)^2 + (z_n - z_1)^2 - r_a^2 \right) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中 (x_1, y_1, z_1) 表示虚拟长机的坐标; k_s 表示增益系数。

无人机所受人势场斥力的合力 F_r 能够使得每架无人机均匀地分布在以虚拟长机坐标 (x_1, y_1, z_1) 为球心的球体表面,每架无人机带有正电荷或者负电荷,带有相同电荷的无人机互相排斥,反之互相吸引。控制力可以保持无人机均匀分布在以虚拟长机坐标 (x_1, y_1, z_1) 为球心、 r_a 为半径的球体表面,当无人机所受到斥力的合力方向与球体表面相切时,则该无人机处于平衡状态,此时所受的合力为0,表示每架无人机之间的相对距离相等,构成了正三角形队形。无人机之间的斥力定义如下

$$F_{mi} = k_r \frac{q_n q_i}{r_{mi}^2} \quad (7)$$

每架无人机所受斥力可以解耦成 x 、 y 、 z 三个坐标轴方向上的分斥力,即

$$\left. \begin{aligned} F_{xr} &= k_r q_n \sum_{i=1, i \neq n}^N \frac{q_i}{r_{mi}^2} \cos\theta_{mi} \cos\varphi_{mi} \\ F_{yr} &= k_r q_n \sum_{i=1, i \neq n}^N \frac{q_i}{r_{mi}^2} \cos\theta_{mi} \sin\varphi_{mi} \\ F_{zr} &= k_r q_n \sum_{i=1, i \neq n}^N \frac{q_i}{r_{mi}^2} \sin\theta_{mi} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

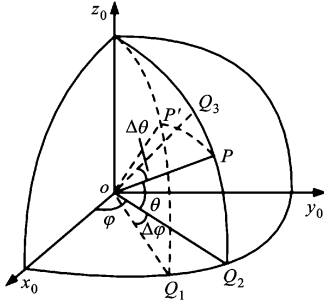
其中

$$\left. \begin{aligned} \sin\theta_{ni} &= \frac{z_n - z_i}{|r_{ni}|} \\ \cos\theta_{ni} &= \frac{\sqrt{(x_n - x_i)^2 + (y_n - y_i)^2}}{|r_{ni}|} \\ \cos\varphi_{ni} &= \frac{x_n - x_i}{\sqrt{(x_n - x_i)^2 + (y_n - y_i)^2}} \\ \sin\varphi_{ni} &= \frac{y_n - y_i}{\sqrt{(x_n - x_i)^2 + (y_n - y_i)^2}} \\ r_{ni} &= \sqrt{(x_n - x_i)^2 + (y_n - y_i)^2 + (z_n - z_i)^2} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

同时,复合控制力如下式所示

$$\left. \begin{aligned} \mu_{xn} &= F_{xna} + F_{xr} \\ \mu_{yn} &= F_{yna} + F_{yr} \\ \mu_{zn} &= F_{zna} + F_{zr} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

由式(8)和式(9)可知,无人机所受到的斥力 F_r 与 $1/r_{ni}$ 成正比,并且通过选择恰当的斥力可避免无人机之间发生碰撞。在式(10)中,控制力 $(\mu_{xn}, \mu_{yn}, \mu_{zn})$ 使得无人机向球体表面移动至平衡位置处。无人机运动方向如图 3 所示。



P 表示无人机初始位置; P' 表示无人机移动后的位置; Q_2 、 Q_1 表示 P 、 P' 在 x_0 - o - y_0 平面的投影; Q_3 表示 P' 在 z_0 - o - Q_2 平面的投影

图 3 无人机运动方向示意图

2.2 虚拟长机控制策略

无人机编队在飞行过程中,虚拟长机运动轨迹作为期望路径,僚机跟踪长机构成三角形编队,长机受到目标的引力作用向目标点运动。长机的位置 $p_l = (x_l, y_l, z_l)$, 目标的位置 $p_t = (x_t, y_t, z_t)$, 无人机所受的引力如下式所示

$$\left. \begin{aligned} \text{if } r < d \\ F_{xa} &= -k_t(x_l - x_t) \\ F_{ya} &= -k_t(y_l - y_t) \\ F_{za} &= -k_t(z_l - z_t) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

else

$$\left. \begin{aligned} F_{xa} &= -k_t(x_l - x_t) \frac{d_{lt}}{r_t} \\ F_{ya} &= -k_t(y_l - y_t) \frac{d_{lt}}{r_t} \\ F_{za} &= -k_t(z_l - z_t) \frac{d_{lt}}{r_t} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中: k_t 为正常数; d_{lt} 为虚拟长机和目标间的相对距离, $d_{lt} = \sqrt{(x_l - x_t)^2 + (y_l - y_t)^2 + (z_l - z_t)^2}$; r_t 为目标简化成球体的半径。

当长机接近目标且它们之间的相对速度增大时,为防止发生碰撞,可通过控制长机所受的阻力来实现避障的目的。定义阻力如下

$$\left. \begin{aligned} F_{x_{dam}} &= -k_m(\dot{x}_l - \dot{x}_t) \\ F_{y_{dam}} &= -k_m(\dot{y}_l - \dot{y}_t) \\ F_{z_{dam}} &= -k_m(\dot{z}_l - \dot{z}_t) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中: k_m 为放大系数。每架无人机所受到的控制力是引力和阻力的合力,即

$$\left. \begin{aligned} F_{x_l} &= F_{xa} + F_{x_{dam}} \\ F_{y_l} &= F_{ya} + F_{y_{dam}} \\ F_{z_l} &= F_{za} + F_{z_{dam}} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

通过以上分析,对单架无人机和虚拟长机的最优控制,能够确保无人机编队系统安全避障且保持良好的稳定性,同时选择最优路径到达目标点。

3 无人机避障策略

无人机编队执行作战任务过程中,避障环节是关键因素之一。避障结束,快速且以最优路径集结成三角形编队,是本文提出避障算法的核心。本文提出一种三维空间复合势场方法来解决这一问题。本节针对单架无人机和多机编队系统分别提出两种控制算法,能够实现快速避障的目的。

3.1 无人机避障方法

在三维空间中,单架无人机追踪虚拟长机,其运动轨迹是设计避障算法的关键。假设无人机视觉传感器感受到的障碍物近似为圆柱体,其表面半径为 r 、高度为 h ,且圆柱体周围产生的人工势场近似为椭球形状。人工势场以最小体积包络住障碍物,即包络住圆柱体的最小椭球体。椭球体满足以下方程

$$\frac{1}{3r^2}(x - x_0)^2 + \frac{1}{3h^2}(y - y_0)^2 + \frac{1}{3r^2}(z - z_0)^2 = 1 \quad (15)$$

无人机编队系统采用人工势场避障,主要取决斥力。当无人机编队接近障碍物时,无人机受到的斥力与其运动速度相反,无人机会处于局部最小位

置,本文提出的复合人工势场将导引无人机避开此位置。复合人工势场能够包围住椭球体,使无人机编队以最优路径绕过障碍物。复合人工势场由分别平行于 x - y 平面和 y - z 平面的两种人工势场复合而成,其示意图如图4所示。

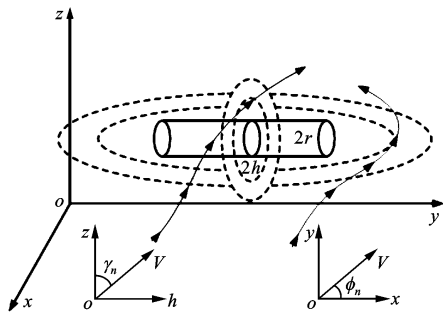


图4 三维空间障碍物周围旋转矢量场

由图4可知,无人机避障轨迹是由两种旋转矢量场叠加作用的结果,同时无人机以最优轨迹快速避障,然后快速集结到达目标点位置。此处 ϕ_n 和 γ_n 分别受两个分矢量场影响,其表达式如下

$$\phi_n = \arctan(\dot{y}, \dot{x}); \gamma_n = \arctan(\dot{z}, \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}) \quad (16)$$

无人机运动轨迹在 x - y 平面的投影曲线,只受与 x - y 平面平行的旋转矢量人工势场影响。旋转矢量人工势场分逆时针和顺时针两个方向。平行 x - y 平面的旋转矢量场的运动学方程如下

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} &= \frac{h}{r}(x - x_0) \\ \dot{y} &= -\frac{r}{h}(y - y_0) \text{ 在顺时针方向} \\ \dot{z} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} &= -\frac{h}{r}(x - x_0) \\ \dot{y} &= \frac{r}{h}(y - y_0) \text{ 在逆时针方向} \\ \dot{z} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

3.2 无人机避障路径优化

无人机编队进入避障区域,避开局部最小值位置且以最短的路径绕过障碍物。针对无人机以最优路径避障,本节提出无人机编队避障优化策略,同时分别以单架无人机和多架无人机编队系统为研究对象,提出控制力概念。

当单架无人机进入障碍物区域或者接近障碍物时,具有三维空间旋转矢量的势场使无人机以期望的路径绕过障碍物。障碍物近似为球体,其最小球体半径为 r_0 ,无人机与障碍物之间的相对距离

满足以下等式

$$r_0 = \sqrt{(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2 + (z - z_c)^2} \quad (19)$$

无人机避障所需的控制力如下式所示

$$F_{nr} = (F_{nrx}, F_{nry}, F_{nrz}) \quad (20)$$

则控制力关系如下

$$\text{if } r_a < r_0$$

$$F_r = F_{des} + \frac{|F_{des}| F_{nr}}{r_0^2} \left(\frac{1}{r_a} - \frac{1}{r_0} \right) \quad (21)$$

else

$$F_r = F_{des} \quad (22)$$

对于虚拟长机,所需的控制力为

$$F_{des} = (F_{dx}, F_{dy}, F_{dz})$$

对于每架僚机,所需的控制力为

$$F_{des} = (F_{dxa} + F_{nr}, F_{dya} + F_{nr}, F_{dza} + F_{nr})$$

基于无人机在 x - y 平面的运动轨迹受旋转矢量人工势场的影响,则无人机避障所需的控制力定义如下

$$\left. \begin{aligned} F_{x_{rxy}} &= k_0 \frac{h}{r}(y - y_0) \\ F_{y_{rxy}} &= -k_0 \frac{h}{r}(x - x_0) \text{ 在顺时针方向} \\ F_{z_{rxy}} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

或者

$$\left. \begin{aligned} F_{x_{rxy}} &= -k_0 \frac{h}{r}(y - y_0) \\ F_{y_{rxy}} &= k_0 \frac{h}{r}(x - x_0) \text{ 在逆时针方向} \\ F_{z_{rxy}} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

式中 k_0 是增益系数。平行于 x - y 平面的顺时针和逆时针方向的人工势场如图5所示。

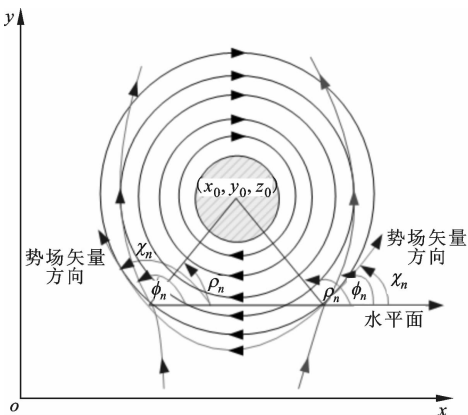


图5 平行于 x - y 平面的人工势场顺时针和逆时针方向示意图

ϕ_n, χ_n, ρ_n 可由下式计算

$$\left. \begin{aligned} \phi_n &= \arctan(\dot{y}, \dot{x}) \\ \chi_n &= \arctan(-r^2 x_0, h^2 y_0) \\ \rho_n &= \arctan(y_0 - y, x_0 - x) \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

障碍物周围产生的旋转矢量方向分两种情况:当 $\phi_n \geq \rho_n$, 则旋转矢量是顺时针方向;当 $\phi_n < \rho_n$, 则旋转矢量是逆时针方向。

基于无人机在 $y-z$ 平面的运动轨迹受旋转矢量人工势场的影响,则无人机避障所需的控制力定义如下

$$\left. \begin{aligned} F_{x_{xyz}} &= k_0 \frac{h}{\sqrt{r^2 + h^2}} (z - z_0) \cos \phi_n \\ F_{y_{xyz}} &= k_0 \frac{h}{\sqrt{r^2 + h^2}} (z - z_0) \sin \phi_n \text{ 在顺时针方向} \\ F_{z_{xyz}} &= -k_0 \frac{\sqrt{r^2 + h^2}}{h} (x - x_0) \cos \phi_n + \\ &\quad \frac{\sqrt{r^2 + h^2}}{h} (y - y_0) \sin \phi_n \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

或者

$$\left. \begin{aligned} F_{x_{xyz}} &= -k_0 \frac{h}{\sqrt{r^2 + h^2}} (z - z_0) \cos \phi_n \\ F_{y_{xyz}} &= -k_0 \frac{h}{\sqrt{r^2 + h^2}} (z - z_0) \sin \phi_n \text{ 在逆时针方向} \\ F_{z_{xyz}} &= k_0 \frac{\sqrt{r^2 + h^2}}{h} (x - x_0) \cos \phi_n - \\ &\quad \frac{\sqrt{r^2 + h^2}}{h} (y - y_0) \sin \phi_n \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

平行于 $y-z$ 平面的顺时针和逆时针方向的人工势场如图 6 所示。

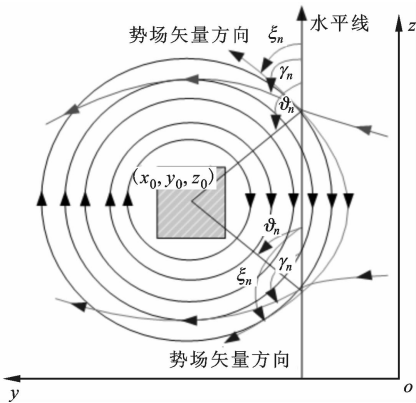


图 6 平行于 $y-z$ 平面的人工势场顺时针和逆时针方向示意图

γ_n 、 ζ_n 和 ϑ_n 可由下式计算

$$\left. \begin{aligned} \gamma_n &= \arctan(\dot{z}, \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}) \\ \zeta_n &= \arctan \left[\frac{h}{\sqrt{h^2 + r^2}} (z - z_0), \right. \\ &\quad \left. - \frac{\sqrt{h^2 + r^2}}{h} (x - x_0) \cos \phi - \right. \\ &\quad \left. \frac{\sqrt{h^2 + r^2}}{h} (y - y_0) \sin \phi \right] \\ \vartheta_n &= \arctan(z_0 - z, \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}) \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

障碍物周围产生的旋转矢量方向分两种情况:当 $\gamma_n \geq \vartheta_n$, 则旋转矢量方向向下;当 $\gamma_n < \vartheta_n$, 则旋转矢量方向向上。当无人机编队接近障碍物,则采取避障机动。通过比较 $|\gamma_n - \zeta_n|$ 和 $|\phi_n - \chi_n|$ 之间的大小关系,可获得避障控制力如下式所示

$$\text{if } |\gamma_n - \zeta_n| < |\phi_n - \chi_n|, \text{ 则} \quad \left. \begin{aligned} F_{x_{nr}} &= F_{x_{xyz}} \\ F_{y_{nr}} &= F_{y_{xyz}} \\ F_{z_{nr}} &= F_{z_{xyz}} \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

else

$$\left. \begin{aligned} F_{x_{nr}} &= F_{x_{xyz}} \\ F_{y_{nr}} &= F_{y_{xyz}} \\ F_{z_{nr}} &= F_{z_{xyz}} \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

将无人机编队系统避障控制力归一化如下

$$F_{nr} = \left(\frac{F_{x_{nr}}}{\|F_{x_{nr}}\|}, \frac{F_{y_{nr}}}{\|F_{y_{nr}}\|}, \frac{F_{z_{nr}}}{\|F_{z_{nr}}\|} \right) \quad (31)$$

4 仿真结果分析

本文使用半物理仿真平台进行仿真实验。仿真过程忽略外界因素干扰,其中包括侧向风和涡旋效应,同时认为障碍物是运动状态。设定初始条件为:4架无人机构成正三角形编队,其中3架无人机和1架虚拟长机,且长机与僚机之间信息双向传递;在无人机编队靠近运动的障碍物过程中,障碍物简化为圆柱体,即禁飞区,其周围的人工势场近似为椭球体。基于无人机编队模型和提出的复合矢量人工势场算法,则无人机编队系统在不同情形下的仿真图如图 7~图 10 所示。

由图 7 可知:一般避障算法应用于无人机编队避障是通过设计内环控制器,来保证无人机编队中靠近障碍物的僚机与障碍物之间的相对距离大于安全距离,但避障后自调整速度慢、路径较远;人工势场算法最大的优势是避障路径较短、动态响应较快、稳定较好,但在连续避障过程中可能会出现迟滞现

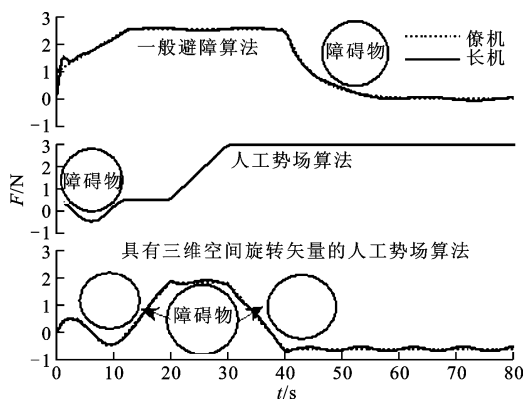


图7 无人机在不同算法下的避障轨迹图

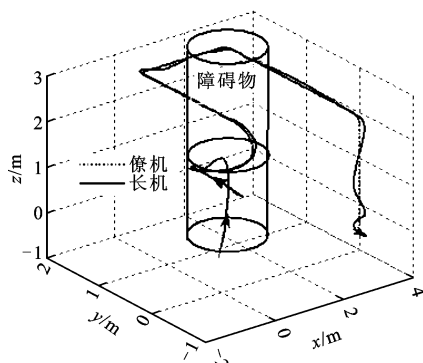


图8 “长机-僚机”控制策略的避障图

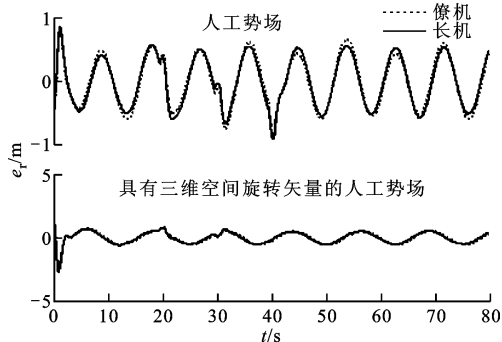


图9 无人机在两种人工势场作用下横侧向距离误差对比图

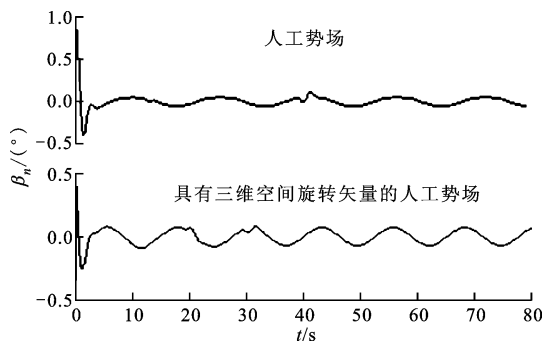


图10 无人机编队在两种人工势场作用下航向角变化对比图

象;将具有三维空间旋转矢量的人工势场应用到编队避障过程,无人机编队可连续避障,避开局部最小位置,且以最优路径避开障碍物,而后保持良好的稳定性和鲁棒性快速集结成正三角形编队飞行。

由图8可知,虚拟长机按照期望的轨迹飞行,僚机跟随其后构成编队有效地避开障碍物,之后又重组队形飞行。图中长机和僚机的初始位置分别为 $(2, 1, 1.5)$ 和 $(1, 1, 1.2)$,且障碍物中心位置为 $(2.2, 1.5, 0.8)$ 。设置 $k_r=4, k_s=5, k_t=2, k_m=1.5, D=2, r_a=1$,基于三维空间旋转矢量的人工势场算法,在虚拟结构和“长机-僚机”控制策略情形下,无人机编队接近障碍物以平滑的轨迹避开障碍物,然后集结成三角形编队追踪目标到达目标点。在此过程中,无人机编队保持良好的稳定性,有效地验证了所提出算法的有效性和可行性。

由图9可知,在具有三维空间旋转矢量的人工势场中,无人机编队与障碍物之间保持安全距离且选择最优路径进行连续避障,它们之间的横侧向距离误差变化幅值很小,动态响应快,队形保持良好。

由图10可知:在一般人工势场作用下,无人机通过视觉传感器感知目标后,以最大的安全距离避开障碍物,而且小幅度平滑转弯的地方很少,曲线振荡频率低且没有较大的波峰或者波谷,这种避障方式不足之处在于避障路径较远、损耗较大、效率较低;在具有三维空间旋转矢量的人工势场作用下,无人机进行连续平滑转弯,选择最优路径避障,即无人机基本贴近障碍物包络线运动,曲线呈现连续等幅振荡趋势。这说明无人机在保持安全距离的情况下,运动轨线基本与障碍物的包络线相切,则航向角呈现一种连续小幅振荡趋势。

5 总结与展望

基于虚拟“长机-僚机”控制策略,本文提出一种具有三维空间旋转矢量的人工势场方法,解决了无人机编队避障过程易陷局部最小位置的问题。复合人工势场由平行于 $x-y$ 平面和 $y-z$ 平面的人工势场复合而成,可以避开障碍物周围每个局部最小位置,而且以最优路径快速绕过障碍物,集结编队飞行到达目标点。在此过程中,引力使3架无人机和虚拟长机保持正三角形队形,同时驱使无人机编队朝向目标运动,而斥力能够避免无人机之间发生碰撞,同时也避免无人机与障碍物发生碰撞,达到避障的目的。当无人机速度过大或者障碍物周围产生的球形人工势场强度较弱时,可能会发生碰撞,这种算法可

能会失效,因此下一步工作需综合考虑多种因素,尽可能贴近工程实际。

参考文献:

- [1] FORSMO E J, GRØTLI E I, FOSSEN T I, et al. Optimal search mission with unmanned aerial vehicles using mixed integer linear programming [C]//International Conference on Unmanned Aircraft Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2013: 253-259.
- [2] PENG Z, WEN G, RAHMANI A, et al. Leader-follower formation control of nonholonomic mobile robots based on a bioinspired neurodynamic based approach [J]. *Robotics & Autonomous Systems*, 2013, 61(9): 988-996.
- [3] BIAN X, MOU C, YAN Z, et al. Formation coordinated control for multi-AUV based on spatial curve path tracking [C]//International Conference on Control Applications. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2011: 1-6.
- [4] HU J, FENG G. Distributed tracking control of leader-follower multi-agent systems under noisy measurement [J]. *Automatica*, 2010, 46(8): 1382-1387.
- [5] 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.
- [6] WEI R, SORENSEN N. Distributed coordination architecture for multi-robot formation control [J]. *Robotics & Autonomous Systems*, 2008, 56(4): 324-333.
- [7] REN W. Consensus tracking under directed interaction topologies: algorithms and experiments [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2009, 18(1): 230-237.
- [8] MENG Z, REN W, CAO Y, 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.
- [9] YOSHIOKA C, NAMERIKAWA T. Observer-based consensus control strategy for multi-agent system with communication time delay [C]//IEEE International Conference on Control Applications. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 1037-1042.
- [10] 周稼康, 胡庆雷, 马广富, 等. 基于一致性算法的卫星编队姿轨耦合的协同控制 [J]. *系统工程与电子技术*, 2011, 33(4): 825-832.
- ZHOU Jiakang, HU Qinglei, MA Guangfu, et al. Cooperative attitude and translation control of satellite formation flying using consensus algorithm [J]. *System Engineering and Electronics*, 2011, 33(4): 825-832.
- [11] 王荣浩, 邢建春, 王平, 等. 地面无人系统的多智能体协同控制研究综述 [J]. *动力学与控制学报*, 2016, 14(2): 97-108.
- WANG Ronghao, XING Jianchun, WANG Ping, et al. An overview on multi-agents cooperative control of unmanned ground system [J]. *Journal of Dynamics & Control*, 2016, 14(2): 97-108.
- [12] FLACCO F, KRÖGER T, LUCA A D, et al. A depth space approach to human-robot collision avoidance [C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2012: 338-345.
- [13] COUCEIRO M S, RUI P R, FERREIRA N M F. A novel multi-robot exploration approach based on particle swarm optimization algorithms [C]//IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2011: 327-332.
- [14] WIDYOTRIATMO A, HONG K S. Navigation function-based control of multiple wheeled vehicles [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, 58(5): 1896-1906.
- [15] 田亚卓, 张勇军. 基于改进人工势场法的动态环境下无人机路径规划 [J]. *武汉科技大学学报*, 2017, 40(6): 451-456.
- TIAN Yazhuo, ZHANG Yongjun. UAV path planning based on improved artificial potential field in dynamic environment [J]. *Journal of Wuhan University of Science & Technology*, 2017, 40(6): 451-456.
- [16] 徐飞. 基于改进人工势场法的机器人避障及路径规划研究 [J]. *计算机科学*, 2016, 43(12): 293-296.
- XU Fei. Research on robot obstacle avoidance and path planning based on improved artificial potential field method [J]. *Computer Science*, 2016, 43(12): 293-296.
- [17] CHANG K, XIA Y, HUANG K. Coordinated formation control design with obstacle avoidance in three-dimensional space [J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2015, 352(12): 5779-5795.

(编辑 荆树蓉)