

无人机编队对地面目标追踪问题研究

常凯¹, 黄考利¹, 马代亮²

(1. 军械工程学院光学与电子工程系, 石家庄 050003; 2. 北京理工大学自动化学院, 北京 100081)

摘要: 针对无人机编队对地面目标追踪问题, 利用虚拟结构结合基于行为的控制方法提出了新的分布式无人机编队策略, 编队无人机均匀分布在以虚拟或者实体领航者为球心的球面上。由李雅普诺夫向量设计出控制量引导编队对地面目标进行追踪, 在有障碍物的环境下通过将障碍物转化为椭圆形的势能场, 并通过计算切线向量作为速度方向, 得到两种平滑的避障轨迹, 并且给出了在无人机编队中的避障轨迹选择策略, 仿真实验验证了策略和算法的有效性。

关键词: 无人机; 编队; 目标追踪; 地面活动目标; 路径规划

中图分类号: V279 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2016)06-0011-05

Ground Moving Target Tracking by Formation of UAVs

CHANG Kai¹, HUANG Kao-li¹, MA Dai-liang²

(1. Optics and Electronic Engineering Department, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China;

2. School of Automation, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: To the issue of tracking the ground moving target by formation of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), this paper presents a new strategy for the formation control in dynamic environment by using virtual structure together with behavior-based control method, with the UAVs distributed uniformly on a spherical surface with the virtual or actual leader as the center. A controlling variable designed by Lyapunov vectors is used for guiding the UAV formation to track the ground target. The obstacles are transformed into elliptic potential fields, and the tangent vector leads the UAV to avoid the obstacle with smooth trajectories. After passing the obstacles, the formation can be reconfigured and continued to track the target. Simulation result verifies the effectiveness of the proposed approach.

Key words: unmanned aerial vehicle; formation; target tracking; ground moving target; path planning

0 引言

近几年, 无人机组成编队相对单无人机在复杂环境条件适应性以及在执行多任务方面呈现出巨大优势, 如救援任务、搜索任务、森林火灾检测等^[1-3], 其中, 多无人机保持编队对移动目标的追踪问题是被广泛关注的一个研究热点。

无人机编队采用了多种策略, 包括基于 leader-follower 结构的控制策略, 在这种结构中, 每一架无人机通过与领航者保持期望距离, 实现编队。这种方法的优点是易于理解、易于实现, 缺点是所有无人机必须保持对领航者行动的感知, 当受到干扰或者编队内某一

架无人机发生故障时, 由于缺少闭环反馈信息, 导致编队失败^[4]。为了解决这个问题, 基于行为的控制策略以及基于虚拟结构的控制策略应运而生, 在虚拟结构控制策略中, 所有无人机追随虚拟领航者, 整体编队被视为一个刚体^[5]。而在基于行为的编队策略中, 并没有确定固定的编队结构, 这种策略在执行一些任务时非常有效, 诸如目标搜索、躲避障碍物^[6]等。

在编队避障算法方面, 文献[7]提出了一种基于人工势能场的方法。利用这种方法, 编队中成员的驱动力取决于同其他成员、目标和障碍物的相对位置。在势能场方法中, 当成员移动方向与障碍物斥力方向相反时, 成员会停止在平衡点上, 造成局部极值问题。文献[8]利用了加入旋转向量的势能场方法, 在二维含有障碍物空间中实现了机器人编队到达目标点。其思想是: 势能场中加入垂直于速度方向的旋转向量, 避免局部极值点问题。在扩展势能场方法到三维包含障碍物空间中, 文献[9]提出了三维空间中无人机的轨

收稿日期: 2015-11-10 修回日期: 2015-12-09

基金项目: 国家杰出青年科学基金(61225015)

作者简介: 常凯(1987—), 男, 河北大城人, 博士生, 研究方向为多无人机协同控制。

迹规划问题,但是没有考虑编队避障的问题,同时目标点是固定的,没有考虑目标移动问题。综上所述,在具有障碍物环境中,设计出针对多无人机编队对移动目标追踪的策略很有意义。

本文首先对无人机动力学方程进行了剖析,在此基础上设计了基于虚拟结构的无人机编队算法,利用改进的势能场方法实现编队避障,并设计了基于李雅普诺夫向量的追踪方法。仿真结果表明,无人机可有效编队并在障碍物环境下对地面目标进行有效追踪。

1 无人机动力学方程与控制

当前应用于无人机的模型有很多种,由于本文针对一种高等级的编队控制,因此选择一个应用广泛的动力学模型描述参与编队的无人机。假设有一个由 N 架无人机组成的编队系统,视无人机为质点,如图1所示。

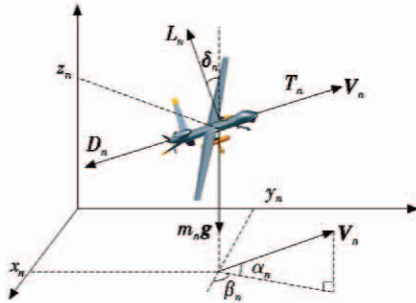


图1 常规无人机模型

Fig.1 Model of UAV

其中: $n = 1, 2, \dots, N$; (x_n, y_n, z_n) 为第 n 架无人机的位置坐标; V_n 为无人机相对地面的速度; α_n 为飞行航迹角; β_n 为航向改变角; T_n 为引擎推力; D_n 为阻力; m_n 为无人机质量; g 为重力加速度; L_n 为无人机升力; δ_n 为倾斜角。无人机的3个控制输入量为 T_n, L_n, δ_n 。对这样的高度非线性的系统模型,采用反馈线性化的方法进行线性化^[10],即

$$\begin{cases} \ddot{x}_n = u_{xn} \\ \ddot{y}_n = u_{yn} \\ \ddot{z}_n = u_{zn} \end{cases} \quad (1)$$

式中, $\ddot{x}_n, \ddot{y}_n, \ddot{z}_n$ 为虚拟的加速度控制输入,其与实际的控制输入关系为

$$\begin{cases} \delta_n = \arctan\left(\frac{u_{zn} \cos \beta_n - u_{zn} \sin \beta_n}{(u_{zn} + g) \cos \alpha_n - (u_{zn} \cos \beta_n + u_{zn} \sin \beta_n) \sin \alpha_n}\right) \\ L_n = m_n \frac{(u_{zn} + g) \cos \alpha_n - (u_{zn} \cos \beta_n + u_{zn} \sin \beta_n) \sin \alpha_n}{\cos \delta_n} \\ T_n = m_n ((u_{zn} + g) \sin \alpha_n + (u_{zn} \cos \beta_n + u_{zn} \sin \beta_n) \cos \alpha_n) + D_n \end{cases} \quad (2)$$

其中: $\tan \beta_n = \dot{y}_n / \dot{x}_n$; $\tan \alpha_n = \dot{z}_n / V_n$ 。因此把线性化模

型的控制输入代入式(2)中可以得到实际系统的控制输入。

2 基于虚拟结构的无人机编队策略

一种基于虚拟结构的编队策略被利用于护航编队,在该策略中,控制量 $(f_{x_n}, f_{y_n}, f_{z_n})$ 指引护航编队中成员均匀分布在以护航目标为中心的球面上,半径为 r_α ,最终形成规则的多面体结构的护航编队。

引理1 虚拟结构控制策略下控制量将指引无人机到达以 (x_c, y_c, z_c) 为中心、以 r_α 为半径的球面上,并保持稳定。无人机的轨迹方程为

$$\begin{cases} \dot{x} = -(x-x_c)[(x-x_c)^2 + (y-y_c)^2 + (z-z_c)^2 - r_\alpha^2] \\ \dot{y} = -(y-y_c)[(x-x_c)^2 + (y-y_c)^2 + (z-z_c)^2 - r_\alpha^2] \\ \dot{z} = -(z-z_c)[(x-x_c)^2 + (y-y_c)^2 + (z-z_c)^2 - r_\alpha^2] \end{cases} \quad (3)$$

式中, (x, y, z) 为无人机位置坐标。如图2所示, O 是参考点, P 是无人机初始位置, P' 是无人机移动后位置, Q_1 是 P 在 X_0-O-Y_0 平面上的投影, Q_2 是 P' 在 X_0-O-Y_0 平面上的投影, Q_3 是 P' 在 Z_0-O-Q_1 平面上的投影。

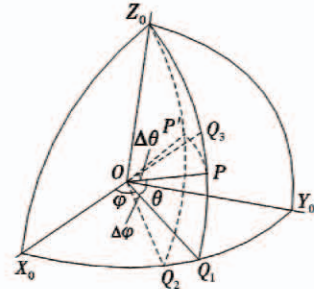


图2 无人机移动方向

Fig.2 Moving direction of the UAVs

为了引导无人机到达球面上形成护航编队,施用于无人机护航编队的控制量可以通过扩展引理1设计为

$$\begin{cases} f_{x_n} = -k_s(x_n - x_c)[(x_n - x_c)^2 + (y_n - y_c)^2 + (z_n - z_c)^2 - r_\alpha^2] \\ f_{y_n} = -k_s(y_n - y_c)[(x_n - x_c)^2 + (y_n - y_c)^2 + (z_n - z_c)^2 - r_\alpha^2] \\ f_{z_n} = -k_s(z_n - z_c)[(x_n - x_c)^2 + (y_n - y_c)^2 + (z_n - z_c)^2 - r_\alpha^2] \end{cases} \quad (4)$$

式中: k_s 为增益参数; (x_n, y_n, z_n) 为第 n 架无人机的坐标。在无人机组成护航编队的策略中,为了安排每一架无人机到达合适的位置,假设在一个多无人机系统中的所有无人机同时带有等量的同极电荷,任意两架无人机之间都会互相排斥;另一方面,位于编队中心的护航目标 (x_c, y_c, z_c) 所提供的控制力约束编队所有成员在半径为 r_α 的球面上。当编队成员到达平衡点时,作

用在其上的合力为零,此时护航编队成员间距离相等,编队形成一个规则的立体形状。在任意两架护航编队成员间的斥力可以表述为

$$F_{ni} = k_r \frac{q_n q_i}{r_{ni}^2} \quad (5)$$

式中: k_r 为互斥的常量系数; q_n 为第 n 架无人机假设带电量; q_i 为第 i 架无人机的带电量; r_{ni} 为第 n 架和第 i 架无人机之间的距离。假设组成护航编队的无人机数量为 N ,那么作用在第 n 架无人机上的合力可以表达为

$$F_n = k_r q_n \sum_{i=1, i \neq n}^N \frac{q_i}{r_{ni}^2} \quad (6)$$

即把合力分解为 x, y, z 3个沿轴方向的分量,这3个分量可以分别表述为

$$\begin{cases} F_{xn} = k_r q_n \sum_{i=1, i \neq n}^N \frac{q_i}{r_{ni}^2} \cos \theta_{ni} \cos \varphi_{ni} \\ F_{yn} = k_r q_n \sum_{i=1, i \neq n}^N \frac{q_i}{r_{ni}^2} \cos \theta_{ni} \sin \varphi_{ni} \\ F_{zn} = k_r q_n \sum_{i=1, i \neq n}^N \frac{q_i}{r_{ni}^2} \sin \theta_{ni} \end{cases} \quad (7)$$

因此,依据之前的第 n 架无人机的动力学方程式(1),在组成护航编队策略中,其加速度控制输入可以表述为

$$\begin{cases} \ddot{x}_n = \frac{f_{xn}(vs) - k \dot{x}_n}{M} \\ \ddot{y}_n = \frac{f_{yn}(vs) - k \dot{y}_n}{M} \\ \ddot{z}_n = \frac{f_{zn}(vs) - k \dot{z}_n}{M} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $f_{xn}(vs) = F_{xn} - f_{xn}$; $f_{yn}(vs) = F_{yn} - f_{yn}$; $f_{zn}(vs) = F_{zn} - f_{zn}$ 。

根据上文,无人机之间的互斥力和 $1/r_{ni}$ 成比例关系,因此当两机过近时可以防止碰撞的发生,控制力 $(f_{xn}(vs), f_{yn}(vs), f_{zn}(vs))$ 引导无人机到达球面上。在随后的示例1中将给出编队策略的描述。

示例1 考虑5架无人机组成护航编队,初始位置分别是 $(2, 1, 2), (-1, -1, -1), (-3, 4, -2), (4, 2, 2), (3, 3, 3)$,假设护航目标位于 $(0, 0, 0)$,控制参数分别设为 $k_x = 1, q_i = 10, k_r = 0.2, r_a = 2$ 。利用已给出的动态方程式(10)、式(11),护航无人机最终形成了双三角锥形的编队,如图3所示,采用这种护航策略,不需要预设无人机在编队中的位置,另一个优点是当护航编队中无人机数目发生增减的时候,编队将自动转变为新的双锥体队形。

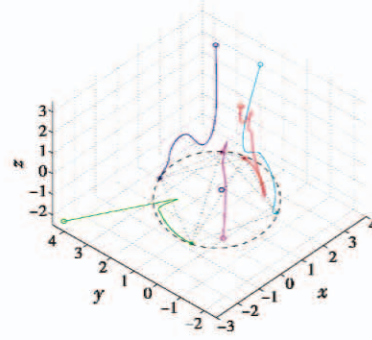


图3 组成编队轨迹

Fig.3 Trajectory of the UAV formation construction

3 护航编队的移动

根据上文,给出了无人机护航编队围绕一个固定位置均匀分布在以其作为球心、半径为 r 的球面上,并且组成了规则的双锥体形编队。在实际的编队飞行过程中,编队内所有无人机需要在保证编队结构不变的情况下对地面目标进行追踪。控制量可以表示为

$$\begin{cases} f_{xn}(vs) = F_{xn} - k_s(x_n - x_c)[(x_n - x_c)^2 + (y_n - y_c)^2 + (z_n - z_c)^2] \\ f_{yn}(vs) = F_{yn} - k_s(y_n - y_c)[(x_n - x_c)^2 + (y_n - y_c)^2 + (z_n - z_c)^2] \\ f_{zn}(vs) = F_{zn} - k_s(z_n - z_c)[(x_n - x_c)^2 + (y_n - y_c)^2 + (z_n - z_c)^2] \end{cases} \quad (9)$$

式中, (x_c, y_c, z_c) 为编队中心的坐标。编队中心的动态方程可以表示为

$$\begin{cases} \ddot{x}_c = (f_{xc} - k \dot{x}_c)/M \\ \ddot{y}_c = (f_{yc} - k \dot{y}_c)/M \\ \ddot{z}_c = (f_{zc} - k \dot{z}_c)/M \end{cases} \quad (10)$$

式中, (f_{xc}, f_{yc}, f_{zc}) 为编队中心的控制量。在对地面目标追踪问题上,假设无人机高度不变,考虑李雅普诺夫函数 $V_t(x, y) = (r_t^2 - r_d^2)^2$,其中, $r_t = \sqrt{(x_c - x_t)^2 + (y_c - y_t)^2}$ 表示映射在地面上的编队中心距离地面目标的距离, r_d 为编队追踪到目标后围绕地面目标做稳定圆形飞行的半径。可以得到 $\dot{V}_t = \nabla V_t [\dot{x}, \dot{y}]^T$,通过选择期望的相对速度 v_0 保证 \dot{V}_t 非正,即

$$\begin{cases} f_{xc} = k_a \left(\frac{-v_0}{r_t} \right) \left[(x_c - x_t) \frac{r_t^2 - r_d^2}{r_t^2 + r_d^2} + (y_c - y_t) \frac{2r_t r_d}{r_t^2 + r_d^2} \right] \\ f_{yc} = k_a \left(\frac{-v_0}{r_t} \right) \left[(y_c - y_t) \frac{r_t^2 - r_d^2}{r_t^2 + r_d^2} - (x_c - x_t) \frac{2r_t r_d}{r_t^2 + r_d^2} \right] \end{cases} \quad (11)$$

$k_a v_0$ 为正, 这样, 除 $r_t = 0$ 之外, 保证在任意一点的编队中心相对地面目标的移动速度为 $|(f_x, f_y)| = k_a v_0$ 。用极坐标形式表示为

$$\begin{cases} \dot{r}_t = k_a v_0 \left(-\frac{r_t^2 - r_d^2}{r_t^2 + r_d^2} \right) \\ r_t \dot{\omega} = k_a v_0 \left(\frac{2r_t r_d}{r_t^2 + r_d^2} \right) \end{cases} \quad (12)$$

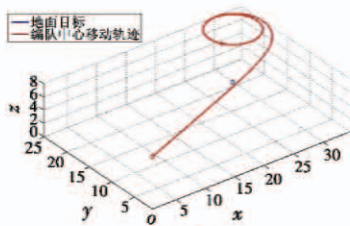
由此推导出

$$\frac{dV_t}{dt} = \frac{-4k_a v_0 r_t (r_t^2 - r_d^2)^2}{r_t^2 + r_d^2} \quad (13)$$

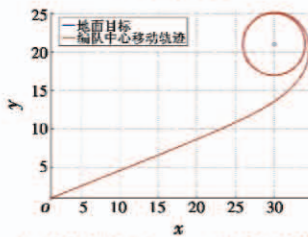
显然当 $r_t = r_d$ 时, 即处在稳定圆上时 $\dot{V}_t = 0$, 同时存在另外一个情况 $r_t = 0$ 时, 目标点坐标和编队中心目标重合, $\dot{V}_t = 0$, 考虑目标追踪问题的本身, 因此在初始状态一般假设编队中心和目标点距离大于稳定圆半径。编队移动方向可以确定为

$$\varphi_c = \arctan\left(\frac{f_{yc}}{f_{xc}}\right) = \arctan\left(\frac{(y_c - y_t)(r_t^2 - r_d^2) - 2r_t r_d (x_c - x_t)}{(x_c - x_t)(r_t^2 - r_d^2) - 2r_t r_d (y_c - y_t)}\right) \quad (14)$$

追踪轨迹如图4所示。



a 追踪轨迹



b 追踪轨迹在 x - o - y 平面上的投影

图4 追踪轨迹

Fig. 4 Trajectory of UAV target tracking

4 编队的避障策略

考虑无人机编队对地面目标的追踪问题, 无人机位置已知, 假设障碍物可以被无人机上的探测器观测到, 不失一般性, 设定障碍物为长方体, 可表达为 $(x_o \pm l_1, y_o \pm l_2, z_o \pm l_3)$, 其中, (x_o, y_o, z_o) 为障碍物中心, $(\pm l_1, \pm l_2, \pm l_3)$ 为障碍物的长、宽、高, 分别平行于坐标轴, 在地面上可以用包含障碍物的椭圆来表示。

引理2 在平行于 x - o - y 的平面上, 包含障碍物的

椭圆中面积最小的椭圆表达式为

$$\frac{1}{2l_1^2}(x-x_o)^2 + \frac{1}{2l_2^2}(y-y_o)^2 = 1 \quad (15)$$

证明 假设椭圆表达式为

$$A^2(x-x_o)^2 + B^2(y-y_o)^2 = 1 \quad (16)$$

因为椭圆的面积与 $1/AB$ 成正比例关系, 代入端点坐标可以得到

$$A^2 l_1^2 + B^2 l_2^2 = 1 \Rightarrow B^2 = \frac{1 - A^2 l_1^2}{l_2^2} \quad (17)$$

则 $(AB)^2$ 最大时满足

$$\frac{\partial (AB)^2}{\partial A} = 0 \quad (18)$$

把式(17)代入式(18)中得到

$$\begin{cases} A = \frac{1}{\sqrt{2l_1^2}} \\ B = \frac{1}{\sqrt{2l_2^2}} \end{cases} \quad (19)$$

将式(19)代入式(16), 引理2得证, 证毕。

假设无人机在障碍物外任意一点 (x_u, y_u) , 可以求得椭圆切线, 椭圆上的切点一般表达式为

$$\begin{cases} x_{1,2} = \frac{\pm l_1^2 [(y_u - y_o) \sqrt{-16l_1^2 l_2^2 + 4l_1^2 (y_u - y_o)^2 + 4l_2^2 (x_u - x_o) + 4l_2^2 (x_u - x_o)}]}{l_1^2 (y_u - y_o) + l_2^2 (x_u - x_o)} \\ y_{1,2} = \frac{\pm l_2^2 [(x_u - x_o) \sqrt{-16l_1^2 l_2^2 + 4l_1^2 (y_u - y_o)^2 + 4l_2^2 (x_u - x_o) + 4l_1^2 (y_u - y_o)}]}{l_1^2 (y_u - y_o) + l_2^2 (x_u - x_o)} \end{cases} \quad (20)$$

在这种情况下, 编队内的任一架无人机的避障方向可以表示为

$$\chi_n = \arctan\left[\frac{y_u - y_{1,2}}{x_u - x_{1,2}}\right] \quad (21)$$

每一架无人机都面临一个避障路线选择问题, 可以选择顺时针方向, 或者选择逆时针方向, 如图5所示。

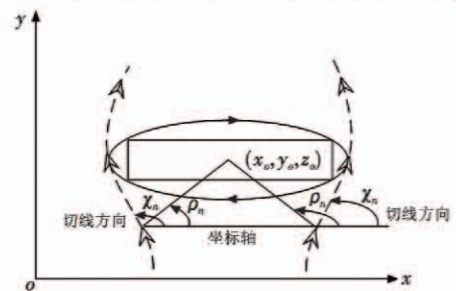


图5 无人机避障轨迹

Fig. 5 Trajectory of UAV in obstacle avoiding

图中, ρ_n 为障碍物中心和无人机的连线与坐标轴方向的夹角, 表示为

$$\rho_n = \arctan\left(\frac{y_o - y_u}{x_o - x_u}\right) \quad (22)$$

通过比较两个角度的大小可以给出避障方向选择策略: 当 $\rho_n \leq \chi_n$ 时, 选择逆时针旋转; 当 $\rho_n > \chi_n$ 时, 选择

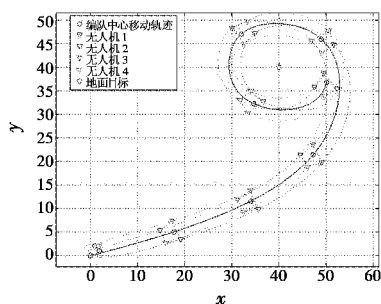
顺时针旋转。

5 仿真分析

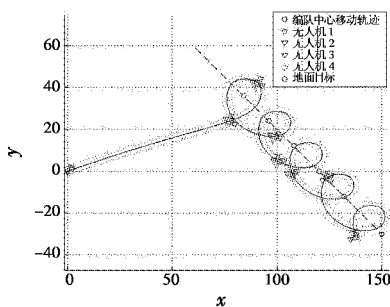
为了验证上述设计的基于自适应扩张状态观测器的自抗扰控制器的控制性能,依次针对编队对地面定点追踪、编队对地面移动目标追踪,编队在有障碍物的情况下对动点追踪进行仿真实验。

仿真选用的参数如下: $M = 10, D = 1, k_r = 5, k_s = 5, k_t = 2, k_m = 1.5, r_a = 2, k_a = 1.2, v = 12$,积分步长 $H = 0.01$ 。图6a为定点地面追踪目标,无人机组成编队后,对地面目标进行追踪,在追踪到后围绕目标做匀速圆周运动。组成编队的无人机初始位置分别为 $p_1 = (2, 2), p_2 = (2, 1), p_3 = (1, 2), p_4 = (2, 0)$,编队核心的初始位置为 $p_c = (0, 0)$ 。

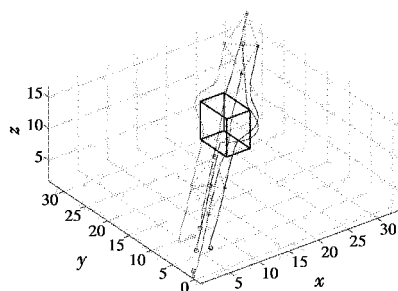
假设目标移动,运动速度为 $v_t = (2, -2)$,无人机达到的最高速度 $v_{max} > v_t$,无人机可以观测到地面目标的位置信息。无人机追踪表现如图6b所示。



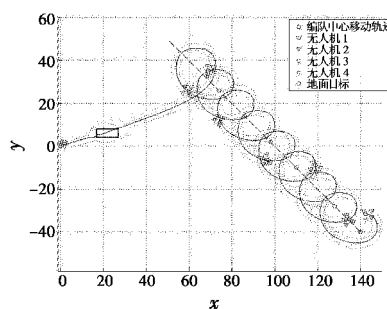
a 对固定目标追踪仿真结果



b 对移动目标追踪仿真结果



c 编队避障仿真结果



d 在含有障碍物时移动目标的追踪仿真结果

图6 仿真结果

Fig. 6 Simulation results

为了验证编队避障算法,编队在三维环境下有障碍物时进行避障实验。考虑5架无人机,初始位置分别为 $p_1 = (0.5, 1, 2.5), p_2 = (3.5, 3.5, 7), p_3 = (2, -1, 6.5), p_4 = (2, 3, 6.5)$,编队核心无人机初始位置为 $p_L = (1, 1, 5.5)$,障碍物位置为 $p_o = (20 \pm 2, 20 \pm 3, 10 \pm 3)$,如图6c所示,编队受到障碍物影响选择不同的避障方向,并且在避障后重组编队,仿真展现了避障算法在避障前后保持了编队的稳定性,采用 leader-follower 结构的编队,其核心既可以是虚拟核心,也可以是实体核心,如图6d所示。

针对图6d编队追踪目标环境,加入障碍物进行了仿真,障碍物位置为 $p_o = (20 \pm 3, 6 \pm 2)$,图6d仿真结果表明,无人机编队采用虚拟核心,在避障过程中,可以更多地兼顾编队成员避障轨迹,并对地面目标完成追踪。

6 结论

本文利用虚拟结构结合基于行为的控制方法提出了新的分布式无人机编队策略,编队无人机均匀分布在以护航目标为球心的球面上。当有无人机进入或者退出编队时,编队将自动调整,形成新的编队。

针对含有障碍物环境下的地面目标追踪问题,通过对障碍物转化为椭圆形的势能场,并通过计算切线向量作为速度方向,得到两种平滑的避障轨迹,给出了在无人机编队中的避障轨迹选择策略,仿真实验验证了策略和算法的有效性。

在未来的工作中,将以此为基础扩展到大数量无人机控制,要考虑通信问题,以及包含不同结构无人机的编队控制问题。

参考文献

[1] LI Z, LIU Y, WALKER R, et al. Towards automatic power line detection for a UAV surveillance system using pulse coupled neural filter and an improved Hough transform[J].

(下转第20页)

- method based on the improved "current" statistical model [J]. *Computer Measurement and Control*, 2013, 21(2):516-519.)
- [5] 尹义蓉,高勇. 基于 UKF 与融合的声探测定位与跟踪 [J]. *电光与控制*, 2010, 17(12):8-12. (YIN Y R, GAO Y. Acoustic detection location and tracking based on UKF and fusion[J]. *Electronics Optics & Control*, 2010, 17(12):8-12.)
- [6] 周宏仁,敬忠良,王培德. 机动目标跟踪 [M]. 北京:国防工业出版社, 1991. (ZHOU H R, JING Z L, WANG P D. *Maneuvering target tracking*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1991.)
- [7] ARASARATNAM I, HAYKIN S. Cubature Kalman filters [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2009, 54(6):1254-1269.
- [8] 张凯,单甘霖. 基于高斯和 SCKF 的姿态角辅助三维目标跟踪 [J]. *控制与决策*, 2015, 30(1):46-51. (ZHANG K, SHAN G L. Pose angle aided 3D target tracking based on Gaussian sum square-root cubature Kalman filter [J]. *Control and Decision*, 2015, 30(1):46-51.)
- [9] 钱华明,陈亮,满国晶,等. 基于当前统计模型的机动目标自适应跟踪算法 [J]. *系统工程与电子技术*, 2011, 33(10):2154-2158. (QIAN H M, CHEN L, MAN G J, et al. Adaptive maneuvering target tracking algorithm based on current statistical model [J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2011, 33(10):2154-2158.)
- [10] 徐景硕,秦永元,彭蓉. 自适应卡尔曼滤波器渐消因子选取方法研究 [J]. *系统工程与电子技术*, 2004, 26(11):1552-1554. (XU J S, QIN Y Y, PENG R. Adaptive Kalman filter fading factor new method for selecting [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2004, 26(11):1552-1554.)
- (上接第 15 页)
- Machine Vision and Applications, 2010, 21(5):677-686.
- [2] WAHARTE S, TRIGONI N. Supporting search and rescue operations with UAVs [C]//IEEE International Conference on Emerging Security Technologies (EST), 2010:142-147.
- [3] MAZA I, KONDAK K, BERNARD M. Multi-UAV cooperation and control for load transportation and deployment [J]. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 2010, 57(1-4):417-449.
- [4] CONSOLINI L, MORBIDI F, PRATTICCHIZZO D, et al. Leader-follower formation control of nonholonomic mobile robots with input constraints [J]. *Automatica*, 2008, 44(5):1343-1349.
- [5] 袁健,唐功友. 采用一致性算法与虚拟结构的多自主水下航行器编队控制 [J]. *智能系统学报*, 2011, 6(3):248-253. (YUAN J, TANG G Y. Formation control of autonomous underwater vehicles with consensus algorithms and virtual structure [J]. *CAAI Transactions on Intelligent Systems*, 2011, 6(3):248-253.)
- [6] 崔荣鑫,徐德民,沈猛,等. 基于行为的机器人编队控制研究 [J]. *计算机仿真*, 2006, 23(2):137-139. (CUI R X, XU D M, SHEN M, et al. Formation control of robots based on behavior [J]. *Computer Simulation*, 2006, 23(2):137-139.)
- [7] LIU C Q, ANG M H, KRISHNAN H. Virtual obstacle-concept for local-minimum-recovery in potential field based navigation [C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2000:983-988.
- [8] REZAEI H, ABDOLLAHI F. A decentralized cooperative control scheme with obstacle avoidance for a team of mobile robots [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, 61(1):347-354.
- [9] GARCIA-DELGADO L, DZUL A, SANTIBÁÑEZ V, et al. Quad-rotors formation based on potential functions with obstacle avoidance [J]. *IET Control Theory & Applications*, 2012, 6(12):1787-1802.
- [10] MENON P K, SWERIDUK G D, SRIDHAR B. Optimal strategies for free-flight air traffic conflict resolution [J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 1999, 22(2):202-211.



请扫描二维码关注我刊