

doi: 10.7690/bgzd.2013.10.008

风场干扰下基于一致性卡尔曼滤波的 UAV 编队控制算法

陈侠, 鹿振宇

(沈阳航空航天大学自动化学院, 沈阳 110136)

摘要: 针对风场干扰下多无人机(UAV)编队的控制问题, 提出一种基于一致性卡尔曼滤波的多无人机编队控制算法。根据一致性卡尔曼滤波算法, 测量每架无人机的风场干扰误差, 预测控制编队中各机的相对位置; 设置编队的中心关键点, 并利用总卡尔曼滤波器调整其位置, 由此实现了一致性卡尔曼滤波算法与航迹修正相结合解决风场干扰下多无人机编队的控制问题; 并将该算法应用到轨迹跟踪问题, 从而实现编队对复杂航迹的实时跟踪。仿真结果表明, 文中提出的算法具有很好的灵活性、鲁棒性、可靠性和可伸缩性。

关键词: 风场干扰; 一致性卡尔曼滤波; 航迹修正; UAV 编队

中图分类号: TJ85 **文献标志码:** A

UAV Control Algorithm Based on Consensus Kalman Filtering Under Wind Interference

Chen Xia, Lu Zhenyu

(School of Automation, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

Abstract: With respect to the problem of controlling unmanned aerial vehicles (UAVs) formation under wind interference, the UAV formation control algorithm based on consensus Kalman filtering algorithm was proposed. Firstly the wind field measurement errors of each UAV can be estimated and the relative position of each UAV in the formation can be predicted by using consensus-based Kalman filtering algorithm. Secondly the formation center is set and its position can be modified by the center Kalman filter. Then the control algorithm is achieved by combining the consensus-based Kalman filtering algorithm and the trajectory correction to solve the problem of UAVs formation under wind interference. At last, this algorithm is applied into the trajectory tracking problem and it can realized the timely tracking of complex formation trajectory. The simulation was computed to show the flexibility, robustness, reliability and scalability of the mentioned algorithm.

Key words: wind interference; consensus-based Kalman filtering; track correction; UAV formation

0 引言

在现代战场中, 小型无人飞行器通常携带各类传感器对战场环境完成测量、信息搜集等任务。但是由于无人飞行器飞行速度相对较低, 容易受到外界风场的影响^[1-2]。在飞行导航、控制和管理系统中, 如何在飞行中获得较精确的风场信息是一个重要的、急需解决的问题。目前, 考虑风场测量误差扰动下无人机的自主飞行控制算法已经成为国内外学者研究的一个热点^[1-9]: Rolf R.在考虑无人机几何路径、控制规则和探视角度等条件的约束下, 给出了无人机在风场中跟踪目标轨迹的修正方法^[3]; Ceccarelli N.等利用整数规划的方法得出无人机航迹修正的最优参数^[4]; John O and Rolf R 利用飞机动力几何关系, 给出了无人机在定长风影响下沿预定路径飞行的修正方法^[5]; 雷旭升和陶冶通过建立矢量场方法, 提出了风场扰动自适应控制方法^[2];

屈耀红等^[6-7]利用位置矢量合成对风场实时估计与航迹修正, 增强了无人机对风场的抗干扰能力; 刘林^[8]将卡尔曼滤波应用到风场的预估计中, 得到一个简单的风场模型, 用于无人机的航迹修正; R. A. Wise^[9]给出了 2 架无人机在风场影响下对移动目标协同跟踪算法等。虽然目前针对风场影响下, 单架无人机的航迹修正和双机协同跟踪目标的算法已取得初步进展, 但有关在风场测量误差影响下, 修正多无人机编队整体航迹的研究还没有文献报道。

多架无人机编队执行任务可以克服单架无人机在信息搜集等方面的局限性。在测量信息扰动的影响下, 单架无人机由于自身传感器的局限性, 往往受扰动的影响较大。而对于多机编队而言, 可以通过分布式多机通信、信息交互的方式, 减少单机估计误差。一致性卡尔曼滤波算法是利用连接拓扑网络, 对不同节点局部的估计信息进行交互滤波, 改善不同节点状态的估计一致性^[10-12]。目前一致性

收稿日期: 2013-05-11; 修回日期: 2013-06-09

基金项目: 国家自然科学基金(61074159); 辽宁省自然科学基金资助项目(20092053)

作者简介: 陈侠(1962—), 女, 辽宁人, 博士后, 教授, 研究生导师, 从事多无人机协同控制与决策、无人航空战博弈策略、多无人机任务规划、飞行器作战效能分析研究。

卡尔曼滤波算法在机器人协同定位中得到应用^[13]，一致性算法也成功应用于多机器人编队^[14]和无人机的协同航迹规划中^[15]。

考虑到定长风影响下的多机编队航迹修正问题，笔者提出基于一致性卡尔曼滤波的多无人机编队控制算法。仿真实验表明，该算法简单有效，能

够实现对复杂航迹的实时跟踪。

1 控制算法原理

基于一致性卡尔曼滤波多无人机编队控制算法是将风场估计与航迹修正相结合的算法。算法分为风场估计和航迹修正 2 个部分。

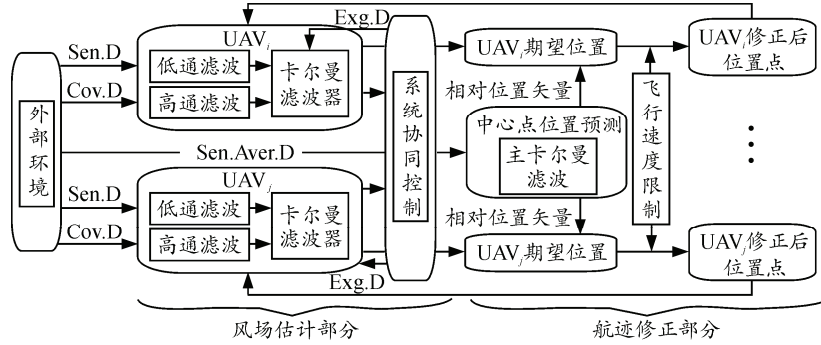


图 1 卡尔曼一致性滤波编队算法的系统模型

如图 1 所示，首先将传感器得到的风场测量数据 (Sen.D) 和协方差数据 (Cov.D) 作为控制系统输入，根据一致性卡尔曼滤波算法，在每架无人机中嵌入一个一致性微卡尔曼滤波器，将滤波处理后 (LPF(low pass filter), HPF(high pass filter)) 的数据带入一致性卡尔曼滤波器进行滤波。在滤波处理的过程中，多无人机编队利用协同控制系统进行信息相互交换 (Exg.D)，以保证其编队中相对位置的固定，降低风场测量信号噪声对编队的干扰。为了保证多无人机编队沿预定的轨迹飞行，将编队中心点作为控制整体编队航迹的关键点，并通过修正这个关键点的位置信息，达到控制整体编队航迹的目的。编队中心点是一个虚拟的节点，将多机测量信号的平均值作为该节点的输入信号 (Sen.Aver.D)，通过主卡尔曼滤波器滤波处理之后，得到中心点的期望位置。再根据无人机速度矢量与航迹路径的几何关系，推断出中心虚拟点的飞行向量。然后，根据飞行器与中心点之间的相对位置矢量及飞行速度限制，求出各架无人机的航迹修正后的期望位置和实际飞行矢量，实现编队整体按照预定的轨迹飞行。

2 UAV 编队控制算法

2.1 风场估计

在无人机飞行的过程中往往受到定长风等风场的影响，无人机通过传感器对风场进行实时采样，以便得到确切的风场信息。但由于传感器本身精度的问题，测量的数据常常出现扰动误差。无人机需要在风场误差干扰下调整自身的飞行状态，以保证

按照预定的轨迹飞行。为了简化运算，假设无人机和风场处于同一平面内，风场测量的噪声信号均为白噪声。以 x 方向上的信号为例，设在 k 时刻风场的状态量为 $x(k)$ ，风场的测量信号量为 $z_i(k)$ ，则风场状态模型和节点测量模型分别为：

$$x(k+1) = A(k)x(k) + B(k)w(k) \tag{1}$$

$$z_i(k) = H_i(k)x(k) + v_i(k) \quad (i \in V) \tag{2}$$

式中： $w(k)$ 为过程噪声信号； $v_i(k)$ 为测量噪声信号； $v_i(k)$ 和 $w(k)$ 均为白噪声信号。 $A(k)$ 、 $B(k)$ 和 $H_i(k)$ 分别为系统状态转移矩阵、噪声矩阵和节点 i 的测量矩阵， V 表示多无人机编队集合，目标初始状态 $x(0)$ 为高斯随机变量， $x(0) \in R^n$ ， $v_i(k)$ 和 $w(k)$ 的期望值为 $E(\cdot)$ ，满足的条件为：

$$E(w(k)w^T(l)) = Q(k)\delta_{kl} \tag{3}$$

$$E(v_i(k)v_j^T(l)) = R_i(k)\delta_{kl}\delta_{ij} \tag{4}$$

$$x(0) \sim N(x_0, P_0) \tag{5}$$

利用一致性滤波算法，对 UAV_i 和其相邻的 UAV 进行交换状态信息，可得到融合后的 UAV_i 状态信息的先验估计值 $\bar{x}_i^c(k)$ ：

$$\begin{aligned} \bar{x}_i^c(k) &= s_i(k) = w_{ii}s_i(k-1) + \sum_{j \in V_i} w_{ij}s_j(k-1) \\ &= w_{ii}\bar{x}_i(k) + \sum_{j \in V_i} w_{ij}\bar{x}_j(k) \quad (k=1,2,\dots) \end{aligned} \tag{6}$$

其中， w_{ij} 为权重系数，采用最大度加权方法， w_{ij} 表示为：

$$w_{il} = \begin{cases} 1/N & l \in V_i \\ 1-(d_i/N) & l = i \\ 0 & l \notin V_i \end{cases} \quad (7)$$

其中： V_i 表示 UAV_{*i*} 连接拓扑的无人机集合； d_i 表示 V_i 中包含无人机的数目； N 表示无人机的总数。

k 时刻状态的估计误差协方差矩阵的估计值 $M(k)$ 表示为

$$M(k) = (P_i^{-1}(k) + S_i(k))^{-1} \quad (8)$$

其中， $P_i(k)$ 表示 k 时刻状态的估计误差协方差矩阵的预测值，利用一致性算法，可分别得到 k 时刻系统状态估计值 $\hat{x}_i(k)$ 和 $k+1$ 时刻系统状态预测值 $\bar{x}_i(k+1)$ 为：

$$\begin{aligned} \hat{x}_i(k) &= \bar{x}_i^c(k) + M_i(k)(y_i(k) - S_i(k)\bar{x}_i^c(k)) = \\ & \bar{x}_i(k) + M_i(k)(y_i(k) - S_i(k)\bar{x}_i(k)) + \\ & (I - M_i(k)S_i(k)) \sum_{j \in V_i} w_{ij}(\bar{x}_j(k) - \bar{x}_i(k)) \end{aligned} \quad (9)$$

$$\bar{x}_i(k+1) = A(k)\hat{x}_i(k) + r(k) \quad (10)$$

其中， $S_i(k) = \sum_{j \in J_i} H_j^T(k)R_j^{-1}(k)H_j(k)$ ， $y_i(k) =$

$$\sum_{j \in J_i} H_j^T(k)R_j^{-1}(k)z_j(k)$$

进一步调整 $k+1$ 时刻状态的估计误差协方差矩阵的预测值 $P_i(k+1)$ 为

$$P_i(k+1) = A(k)M_i(k)A^T(k) + B(k)Q(k)B^T(k) \quad (11)$$

考虑无人机的编队各机之间需要保持相对固定的距离，需要对受风场影响后的无人机编队的位置进行调整，设 UAV_{*i*} 与 UAV_{*j*} 在 x 方向上的第 k 时刻坐标分别为 $X_i(k)$ 和 $X_j(k)$ ，其期望间距为 d_{ij} ，相对距离差的影响因子为 η ，则 $\hat{x}_i(k)$ 的表达式修改为：

$$\begin{aligned} \hat{x}_i(k) &= \bar{x}_i(k) + M_i(k)(y_i(k) - S_i(k)\bar{x}_i(k)) + (I - M_i(k)S_i(k)) \cdot \\ & \sum_{j \in V_i} w_{ij}(\bar{x}_j(k) - \bar{x}_i(k) + \eta(X_j(k) - X_i(k) - d_{ij})) \end{aligned} \quad (12)$$

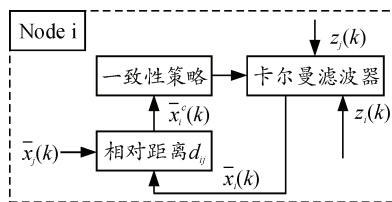


图 2 UAV_{*i*} 的控制子系统模型

根据修改后的 $\hat{x}_i(k)$ 的表达式，多无人机编队中的单架无人机 UAV_{*i*} 的控制子系统模型如图 2 所示。

2.2 航迹修正算法

航迹修正算法是整体编队的修正算法。首先要保证飞行器之间的距离相对固定，然后求出编队的中心节点，通过中心节点的位移矢量，推导出各机的位移矢量。

设 $p_i(k)$ 、 $v_i(k)$ 分别表示 UAV_{*i*} 在 k 时刻的目标状态和风向向量 ($k=1,2,3,\dots$)，则令多无人机编队中心点的目标状态、风向向量分别为 $P(k) = \sum_{i=1}^n p_i(k)/n$ ， $V(k) = \sum_{i=1}^n v_i(k)/n$ ， n 表示无人机的数目。风速影响下编队中心点的预测方法如图 3。

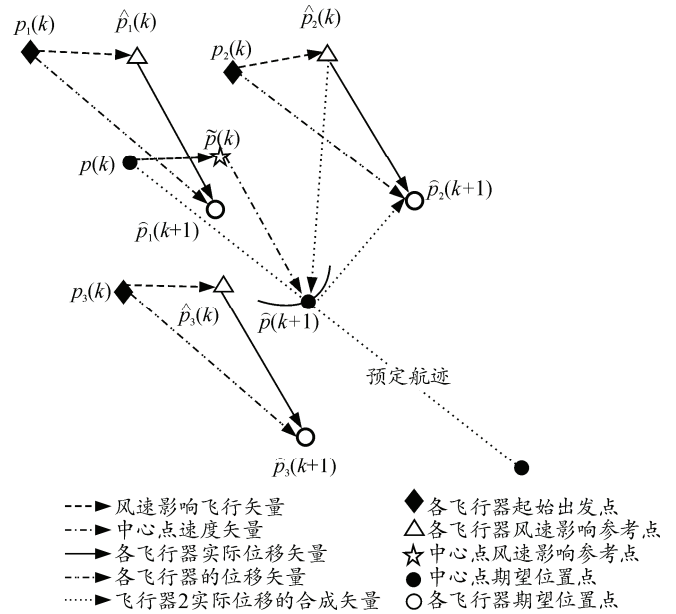


图 3 多无人机编队航迹修正

由图 3 可见，编队 3 架无人机的状态向量分别为 $p_1(k)$ 、 $p_2(k)$ 和 $p_3(k)$ ，通过一致性卡尔曼滤波，得到期望位置分别为 $\hat{p}_1(k)$ 、 $\hat{p}_2(k)$ 和 $\hat{p}_3(k)$ ，则编队中心点期望位置为 $\hat{P}(k) = \sum_{i=1}^n \hat{p}_i(k)/n$ 。由于多无人机编队各点到中心点的距离向量 $d_i(k)$ 与初始队形有关；所以，令 $d_i(k) = p_i(1) - P(1)$ ，同时利用主卡尔曼滤波，得到多无人机编队中心点的预测位置 $\tilde{P}(k)$ ，一般情况下， $\tilde{P}(k)$ 不一定与无人机一致滤波的中心点 $\hat{P}(k)$ 相重合。然后设无人机的单位步长为 l ，根

据飞行器的航迹曲线方程，可以得到与 $\tilde{P}(k)$ 点距离为 l 的 $(k+1)$ 时刻期望位置 $\hat{P}(k+1)$ 。其计算方法为：

设预设的飞行路径拟合方程为 $y = \Psi(x)$ ，多无人机编队中心点的预测位置坐标为 $\tilde{P}(k) = [\tilde{X}(k) \ \tilde{Y}(k)]$ ，中心点在 $(k+1)$ 时刻期望坐标为 $\hat{P}(k+1) = [\hat{X}(k+1) \ \hat{Y}(k+1)]$ ，则 $[\hat{X}(k+1) \ \hat{Y}(k+1)]$ 满足条件为：

$$\begin{cases} |\hat{X}(k+1) - \tilde{X}(k)|^2 + |\hat{Y}(k+1) - \tilde{Y}(k)|^2 = l^2 \\ \hat{Y}(k+1) = \Psi(\hat{X}(k+1)) \end{cases} \quad (13)$$

然后根据多无人机编队各点到中心点的距离向量 d_i ，得到各点的飞行期望节点。则对于 UAV_{*i*} 每一步的位移向量分为 3 个向量之和，其中包含预测位置 $\hat{z}_i(k)$ 与当前位置 $z_i(k)$ 的差向量 $\Delta z_i(k) = \hat{z}_i(k) - z_i(k)$ 、多无人机编队中心点的速度向量 $C(k) = \hat{P}(k+1) - \hat{P}(k)$ 及相对中心点的位移向量 d_i ，则 k 时刻 UAV_{*i*} 的期望位移向量为

$$\Delta V_{ix}(k) = \Delta z_i(k) + C(k) + d_i(k) \quad (14)$$

设 UAV_{*i*} 的飞行向量为 $\Delta F_i(k) = C(k) + d_i(k)$ ，虽然无人机可以沿着向量 $\Delta F_i(k)$ 进行飞行，但是受到 l 长度的限制，可能 UAV_{*i*} 不能到达期望的位置 $\hat{p}_i(k+1)$ ，则需要比较步长 l 和 $|\Delta F_i(k)|$ 长度之间的关系，设 $\Delta F_i(k) = [\Delta F_{ix}(k) \ \Delta F_{iy}(k)]$ ，则可以求得 UAV_{*i*} 的实际飞行向量 $\Delta f_i(k)$ 为：

$$\Delta f_i(k) = \begin{cases} [l \times \Delta F_{ix}(k) / |\Delta F_i(k)|, \ l \times \Delta F_{iy}(k) / |\Delta F_i(k)|] & \text{if } l < |\Delta F_i(k)| \\ [\Delta F_{ix}(k), \Delta F_{iy}(k)] & \text{if } l > |\Delta F_i(k)| \end{cases} \quad (15)$$

于是，可以得到各点的实际位移向量为

$$\Delta \bar{V}_{ix}(k) = \Delta z_i(k) + \Delta f_i(k) \quad (16)$$

3 仿真

假设在定长风的影响下，多无人机编队以正弦曲线航迹飞行，3 架无人机起始点坐标分别为 $[10\ 000, 7\ 000]$ 、 $[10\ 000, 12\ 000]$ 和 $[12\ 000, 9\ 000]$ ，编队中各机和中心点的速度相同，均为 $V = 100\ \text{m/s}$ ，检测时间的间隔为 $10\ \text{s}$ ，中心点航迹表达式为 $y = 2\ 000 \sin(x/1\ 200)/3$ ，定长风风速为 $v = 40\ \text{m/s}$ ，与 x 轴方向之间的夹角为 45° ，多无人机编队之间的参考向量为 $[1\ 300, 1\ 600]$ ， $[1\ 300, 1\ 600]$ 和 $[0, 3\ 200]$ 。

通过图 4 可以看出，飞行器 1、飞行器 2 及飞行器 3 均能够实现沿预定期望的轨迹飞行，同时飞行器编队能够保持期望的队形，而且编队整体和编队中心的实际轨迹与期望预定轨迹的偏差较小，滤波结果如图 5 所示。

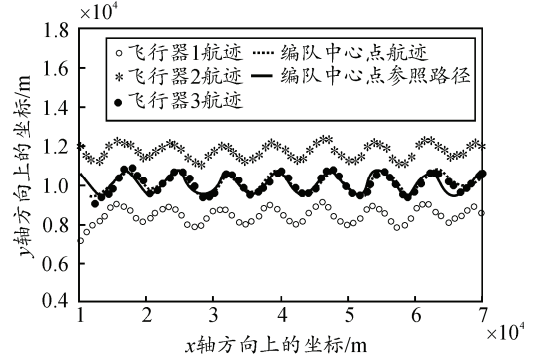
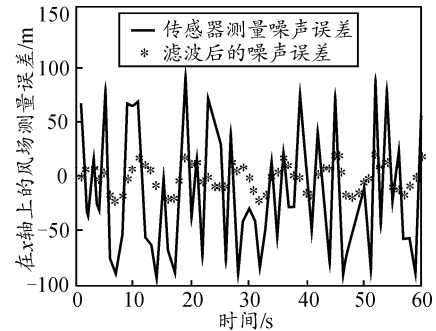
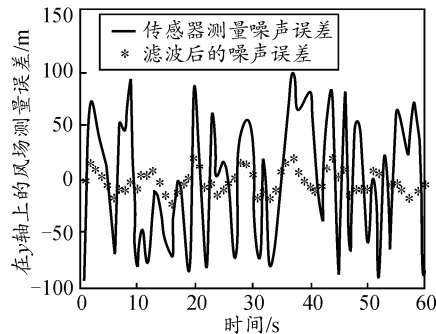


图 4 在风场中多无人机编队飞行航迹



(a) 在 x 轴方向上



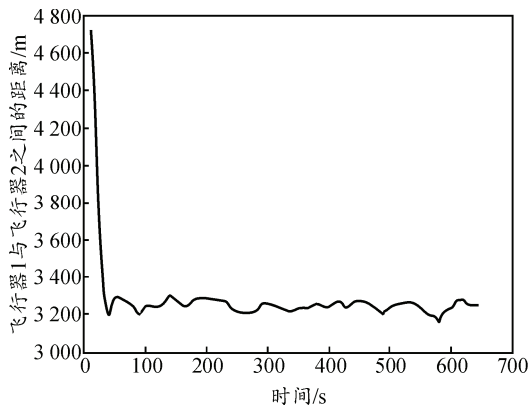
(b) 在 y 轴方向上

图 5 测量误差比较

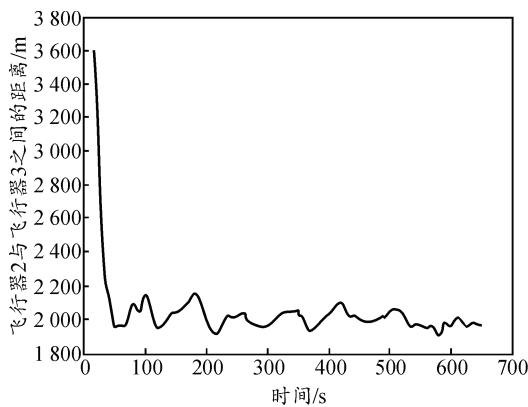
通过图 5 和表 1 的结果不难看出，利用一致性滤波得到的测量误差要比实际风场测量的误差小很多，保证了飞行器之间距离的稳定性。无人机之间的间距如图 6 所示。

表 1 UAV₂ 滤波前后测量误差的比较

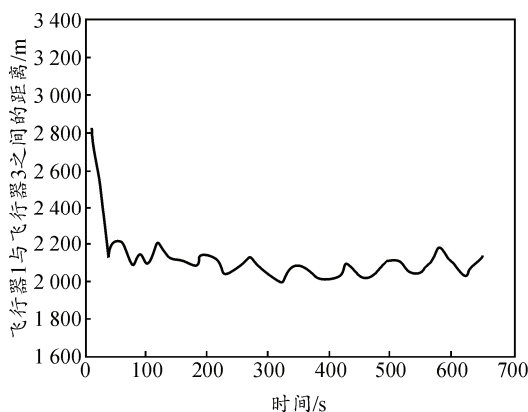
滤波误差 $10^{-1}(\text{m/s})$	X 方向		Y 方向	
	滤波前	滤波后	滤波前	滤波后
未滤波	48.648 2	99.740 6	48.675 8	99.087 6
一致滤波	9.5120 0	23.496 9	10.793 9	22.943 7



(a) 无人机 1 与无人机 2 之间的间距



(b) 无人机 2 与无人机 3 之间的间距



(c) 无人机 1 与无人机 3 之间的间距

图 6 无人机之间的间距

从图 6 中可以看出,在一致性滤波算法的影响下,在 40 s 之前飞行器主要是群集,飞行器之间的距离迅速减小,40 s 之后飞行器编队之间的位置相对固定,在多无人机编队飞行的过程中,虽然编队会受到风场的影响,无人机之间的间距会有一些的变化,但是并不影响,编队整体的稳定性。

4 结束语

仿真结果表明:该算法能够保证编队队形的相

对稳定,使编队整体按照预定的轨迹飞行,能够实现风场影响下多无人机编队整体对复杂航迹的实时跟踪,并且航迹偏差较小。该方法也可推广到多无人机对地面未知区域的协同搜索中。目前,笔者仅对多无人机编队轨迹修正算法进行了初步研究,下一步工作将对可变队形的无人机编队航迹修正算法进行研究。

参考文献:

- [1] 刘伟, 赵伟, 刘建业. 抗野值自适应 Kalman 滤波在无人机测风数据处理中的应用[J]. 导弹与制导学报, 2011, 31(3): 237-240.
- [2] 雷旭升, 陶冶. 小型无人飞行器风场扰动自适应控制方法[J]. 航空学报, 2010, 31(6): 1171-1176.
- [3] Enright J J, Frazzoli E, Rasmussen S J, et al. Micro UAV Path Planning for Reconnaissance in Wind[C]. Proceedings of the 2007 American Control Conference, 2007: 5310-5315.
- [4] John O, Rolf. Waypoint Guidance for Small UAVs in Wind[C]. Proceedings of the AIAA InfoTech at Aerospace Conference, 2005: 1-12.
- [5] Rolf R. UAV Path Following for Target Observation in Wind[J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 2006, 29(5): 1092-1100.
- [6] 屈耀红, 凌琼, 闫建国, 等. 无人机 DR/GPS/RP 导航中风场估计仿真[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(7): 1822-1825.
- [7] 屈耀红. 小型无人机航迹规划及组合导航关键技术研究[J]. 西北工业大学自动化学院, 2006.
- [8] 刘林. 在飞行中进行风场估计[J]. 飞行力学, 1992, 10(3): 41-48.
- [9] Wise R A. UAV Control and Guidance for Autonomous Cooperative Tracking of a Moving Target[M]. University of Washington, Aeronautics & Astronautics, 2006.
- [10] 席峰, 刘中. 基于信息矩阵加权一致策略的分布式 Kalman 滤波器[J]. 信息与控制, 2010, 39(2): 194-199.
- [11] Spanos P D, Saber O R, Murray R M. Dynamic Consensus on Mobile Networks[C]. Proceeding of the 16th IFAC World Congress, 2005.
- [12] 杨文, 侍洪波, 汪小帆. 卡尔曼一致滤波算法综述[J]. 控制与决策, 2011, 26(4): 481-488.
- [13] 王义. 基于一致性 Unscented 卡尔曼滤波的多机器人定位[J]. 计算机技术与发展, 2011, 21(3): 24-27.
- [14] 吴正平, 关治洪, 吴先用. 基于一致性理论的多机器人系统队形控制[J]. 控制与决策, 2007, 22(11): 1241-1244.
- [15] Ren W. Trajectory Tracking Control for a Miniature Fixed-wing Unmanned Air Vehicle[J]. International Journal of Systems Science, 2007, 38(4): 361-369.