

基于自适应滤波的无人机编队防碰撞系统研究

付幼明, 闫建国, 屈耀红, 朱 旭

(西北工业大学 自动化学院, 陕西 西安 710129)

摘 要:针对无人机双机近距离编队飞行时,易发生碰撞事故的问题,文中提出了有效控制的防碰撞算法,并建立了半物理仿真系统。采用自适应 Kalman 滤波为防碰撞控制算法,使编队的距离保持在安全范围之内。该算法通过预测僚机的状态,实时控制僚机机动,当编队达到警戒距离时,僚机迅速执行规避动作,双机分离。搭建了模拟编队飞行的半物理仿真平台,用 Zigbee 实行无线通讯,以超声波实现机间测距。实验结果表明,该系统能防止编队发生碰撞,并且有效抑制滤波发散,具有较好的鲁棒性和实时性。

关键词:双机编队;自适应 Kalman 滤波;半物理仿真

中图分类号:V249;TP273

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2013)04-0254-04

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2013.04.062

Research on Anti-collision System of UAV Formation Based on Adaptive Filtering

FU You-ming, YAN Jian-guo, QU Yao-hong, ZHU Xu

(College of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

Abstract: Aiming to the problem of collision when two unmanned aerial vehicles are in close formation flight, a new algorithm of collision avoidance combined with the HIL (Hardware-In-loop) simulation platform is constructed. Use the adaptive Kalman filter algorithm to make the separation between two airplanes can be held in safety range. The action of the trailing aircraft is controlled by forecasting its condition through the algorithm, and then the evasive action of two aircrafts will be carried out to move away if the separation between two airplanes approaches the warning distance. The HIL platform is constructed to do the formation flight simulation and the wireless communication is achieved by Zigbee to use ultrasonic wave to measure the distance. Results from the experiment show that the collision avoidance can be effectively achieved by the system and filter divergent can be inhibited. Also the system has good robust and real time effect.

Key words: dual-plane formation; adaptive Kalman filter; semi-physical simulation

0 引言

无人机(UAV)具有重量轻、尺寸小、机动性高、隐蔽性好、适应性强和无人员伤亡等特点。在新军事革命的大潮下,现代战争无人化趋势越来越明显^[1],无人机将在未来一体化联合作战中扮演越来越重要的角色。当多无人机编队近距离飞行时,必须确保不发生碰撞。但囿于导航精度的限制和机间测距方法不成熟,防碰撞技术显得尤为重要。目前防碰撞系统主要有超声波测距、红外测距和图像测距三种方式。超声波是指频率高于 20kHz 的机械波。超声波测距采用渡越时间法 TOF(time of flight)。超声波具有指向性强,能量

消耗缓慢,在介质中传播距离较远等优点。但在空气中传播速度慢,测量周期长。而自适应 Kalman 滤波鲁棒性和实时性好,且能有效抑制滤波发散^[2],对解决此问题有良好效果。

1 硬件系统

搭建多无人机防碰撞系统半物理仿真平台^[3]。采用超声波定位和无线通信实现双机半物理仿真,运用小车模拟无人机进行双机防碰撞实验。小车控制系统主要包括带有 falsh 的 C8051F015 单片机,驱动电机的 H 桥芯片 L298, Zigbee 协议的无线通信芯片 XBEE,超声波测距系统,电源系统。当启动超声波测距系统后,测得相应小车的位置信息。由 Zigbee 无线通信将位置信息发至控制电脑。对数据信息进行自适应 Kalman 滤波,并经数据融合后转为小车的左右轮速,由无线通信发回小车,小车按照给定的路线进行相

收稿日期:2012-07-18;修回日期:2012-10-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60974146)

作者简介:付幼明(1989-),男,江西抚州人,硕士研究生,研究方向为控制理论与控制工程。

应的行驶操作。图 1 为操作流程图。

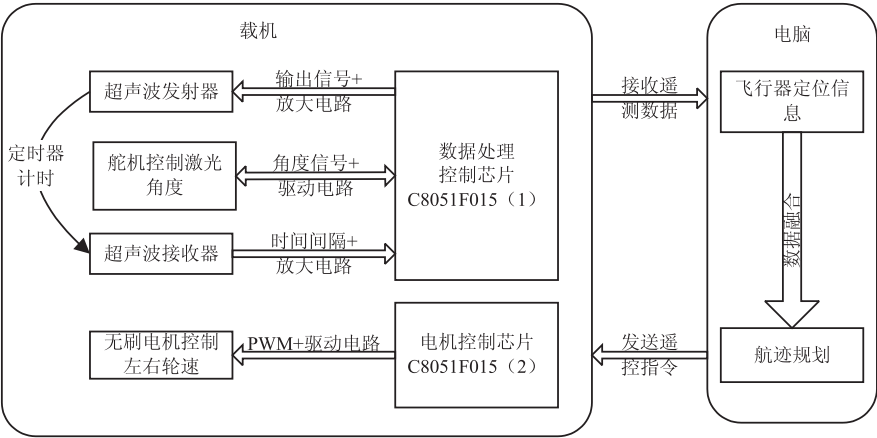


图 1 多无人机防撞撞系统半物理仿真平台

1.1 控制芯片

C8051F015 是一款完全集成的混合信号系统级芯片 (SoC), 具有与 8051 兼容的高速 CIP-51 内核, 与 MCS-51 指令集完全兼容, 外部有丰富的 I/O 资源, 片内集成了 2304 字节数据 RAM 和 32K 字节 Flash, 10 位的 ADC 模块, 两个 12 位的 DAC 和两个模拟比较器, 能满足系统对硬件资源的要求。此外, 该芯片中带有交叉开关模块, 通过设置寄存器可以控制片内的计数器/定时器、串行总线、硬件中断、ADC 转换启动输入、比较器输出等。

1.2 超声波测距系统

超声波指向性强, 能量消耗缓慢, 在介质中传播的距离较远, 因而超声波经常用于距离的测量, 如测距仪等可以通过超声波来实现。利用超声波检测往往比较迅速、方便、计算简单、易于做到实时控制。超声波测距的利用范围越来越广。

首先通过计时器测出超声波从发射到遇到障碍物返回所经历的时间, 再乘以超声波的速度就得到二倍的声源与障碍物之间的距离。

1.3 无线通讯系统

Zigbee 是标准的低功耗个域网协议, 是一种短距离、低功耗的无线通信技术。特点是近距离、低复杂度、自组织、低功耗、低数据速率、低成本。有效距离 100 米左右, 并且可以通过增加网络点数扩展通讯范围。非常适用于无人机近距离编队飞行通讯。

2 自适应 Kalman 滤波算法

2.1 Kalman 滤波

Kalman 滤波器是一种递推滤波器, 它在非平稳时变信号处理过程中实现预测估计。由于采用了递归技术^[4], 运算时只考虑前一个输入信号, 不需要将过去的测量值都存储起来, 因此非常便于计算机处理, 是一种

适合快速跟踪的滤波器^[5]。无人机在双机编队飞行状态中, 相对之间一般处于匀速或匀加速运动状态, 以长机坐标系作为参考坐标系, 建立僚机的系统模型, 状态矢量为僚机的状态信息 (距离 r , 速度 u , 加速度 a , 系统采集周期为 $T = 0.1$) :

$$\begin{cases} X(n+1) = \Phi(n+1, n)X(n) + V_1(n) \\ Z(n) = H(n)X(n) + V_2(n) \end{cases} \quad (1)$$

系统状态矢量: $X(n) = [r(n) \quad u(n) \quad a(n)]^T$
由超声波测距得到的两模拟飞机实际距离为测量矢量: $Z(n) = [z(n)]$ 。

转移矩阵 ($T=0.1$) :

$$\Phi(n+1, n) = \begin{bmatrix} 1 & T(n) & T^2(n)/2 \\ 0 & 1 & T(n) \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

测量矩阵: $H(n) = [1 \quad 0 \quad 0]$ 。
 $X(n)$ 为 3 维系统状态矢量, $\Phi(n+1, n)$ 为 3×3 维矩阵, $Z(n)$ 为 1 维矩阵, $H(n)$ 为 3 维矩阵, $V_1(n), V_2(n)$ 均为零均值的白噪声。

根据递推卡尔曼滤波实现状态 $\hat{X}(n+1, n)$ 最优估计和 $\hat{X}(n)$ 卡尔曼滤波, 推导公式如下:

$$P(0) = E\{[X(0) - E\{X(0)\}][X(0) - E\{X(1)\}]^T\} \quad (2)$$

$$\hat{X}(n, n-1) = \Phi(n, n-1)\hat{X}(n-1) \quad (3)$$

$$P(n, n-1) = \Phi(n, n-1)P(n-1)\Phi^T(n, n-1) + Q \quad (4)$$

$$\hat{X}(n) = \hat{X}(n, n-1) + K(n)[Z(n) - H(n)\hat{X}(n, n-1)] \quad (5)$$

$$K(n) = P(n, n-1)H^T(n)[H(n)P(n, n-1)H^T(n) + R]^{-1} \quad (6)$$

$$P(n) = P(n, n-1) - K(n)H(n)P(n, n-1) \quad (7)$$

$$\hat{X}(n-1) = \Phi^{-1}(n, n-1)\hat{X}(n, n-1) \quad (8)$$

Q 为系统噪声协方差阵, R 为测量噪声协方差阵, $K(n)$ 为 Kalman 滤波的增益, $P(n)$ 为误差方差矩阵^[6]。

2.2 确定 Kalman 初值

为了实现 Kalman 预测的递推处理, 还需要知道系统初始条件: $X(0) = [r(0) \quad u(0) \quad a(0)]$; 当取初值为 $X(0) = [0 \quad 0 \quad 0]$ 时, 开始阶段系统会不稳定, 收敛

速度不理想。为了得到良好的收敛效果,取测量值的前 3 次的一阶差分为初始速度 $u(0)$, 二阶差分为初始加速度 $a(0)$ 。

2.3 建立自适应模型

在无人机飞行过程中,存在各种误差,会对滤波产生影响,使得滤波状态与真实状态不一致,甚至会导致差值远远超过由滤波算法计算出的方差确定的范围,出现滤波发散。所以必须增加系统的发散抑制性。且无人机编队飞行是时变系统,需要增加系统的鲁棒性。自适应环节能有效抑制滤波发散,具有较好的鲁棒性和实时性。

以 $\hat{X}(n)$ 为信号输入,通过系统 $H(n)$ 产生 $B(n)$ 作为自适应器输入,如图 2 所示:

其中

$$B(n) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \hat{X}(k) H(n-k) + V(n) \quad (9)$$

为系统的脉冲响应, $V(n)$ 为噪声。

因为 Kalman 滤波系统输出比较平稳,可得到自适应器的输出:

$$Y(n) = B^T(n) W(n) \quad (10)$$

$\hat{X}(n)$ 的估计误差和均方误差:

$$e(n) = \hat{X}(n) - Y(n) = \hat{X}(n) - B^T(n) W(n) \quad (11)$$

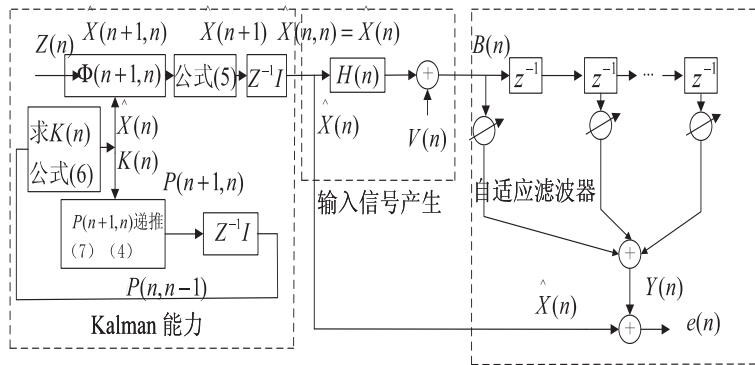


图 2 自适应 Kalman 滤波流程图

$$\xi = E\{e^2(n)\} \quad (12)$$

则使均方误差最小的最佳加权矢量:

$$W_{sj} = R_{xx}^{-1} r_{xd} \quad (13)$$

其中 $R_{xx} = E\{B(n)B^T(n)\}$, $r_{xd} = E\{B(n)\hat{X}(n)\}$

最佳估计误差和最小方差:

$$e_{sj}(n) = \hat{X}(n) - B^T(n) W_{sj} \quad (14)$$

$$\xi_{\min} = E\{e^2(n)\}_{\min} = E\{e_{sj}^2(n)\} \quad (15)$$

当 $W(n)$ 为一般值时,方差为:

$$\xi(n) = E\{[B^T(n)(W_{sj} - W(n)) + e_{sj}(n)]^2\} \quad (16)$$

由于正交原理: $E\{e_{sj}(n)B(n)\} = 0$

得:

$$\xi(n) =$$

$$E\{[W_{sj} - W(n)]^T B(n) B^T(n) [W_{sj} - W(n)]\} + \xi_{\min} \quad (17)$$

加权矢量误差方差:

$$P_w(n) = E\{[W_{sj} - W(n)][W_{sj} - W(n)]^T\} \quad (18)$$

由以上公式推导,可得到以 $\hat{X}(n)$ 为测量值, W_{sj} 为状态矢量的系统模型,从而推导出最佳的加权矢量 $W_{sj}^{[7]}$ 。

$$\begin{cases} W_{sj}(n) = W_{sj}(n-1) \\ \hat{X}(n) = B^T(n) W_{sj}(n) + e_{sj}(n) \end{cases} \quad (19)$$

预测 $\hat{X}(n)$ 的测量值 $\hat{X}(n)$ 和新状态矢量估计值:

$$\hat{X}(n) = B^T(n) W_{sj}(n-1) \quad (20)$$

$$W_{sj}(n) = W_{sj}(n-1) + K_w(n) [D(n) - B^T(n) W_{sj}(n-1)] \quad (21)$$

增益矩阵和误差方差矩阵:

$$\begin{aligned} K_w(n) &= P_w(n-1) B(n) [B^T(n) P_w(n-1) \\ &\quad B(n) + \xi_{\min}]^{-1} \end{aligned} \quad (22)$$

$$P(n) = P(n-1) - K(n) X^T(n) P(n-1) \quad (23)$$

$K_w(n)$ 的计算只要求纯量求逆, ξ_{\min} 是先验位置的,对于一般的自适应均衡器,可取 ξ_{\min} 为 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ 之间,利用系数常数化减少系统繁琐程度。则计算量大大的减少,符合实时性要求^[8~10]。

初始值设定: $W_{sj}(0) = [1 \ 0 \ 0]^T$,

$$P_w(0) = I。$$

通过以上自适应卡尔曼滤波公式推导,得到最佳的自适应参数 $W_{sj}(n)$ 。从而由卡尔曼自适应滤波得到最佳的状态矢量估计值 $\hat{X}(n)$ 。

3 仿真分析

为验证卡尔曼自适应滤波模型性能,通过对无人机半物理控制仿真系统进行调试,模拟双机防撞系统飞行。

设定:相对距离最小阈值 $r_{\min} = 10\text{m}$,相对距离初始值 $r_0 = 10\text{m}$,相对速度 $V = 0\text{m/s}$ 。

为禁止飞机碰撞,当机间距离 $r \leq r_{\min}$ 时,双机设定朝相反方向运动,由半物理仿真实验平台进行仿真,得到双机运动时相对距离的测试数据^[11]。截取数据进行 matlab 仿真(如图 3 所示)。起始点为 10m,滤波前后速度对比见图 4,速度对比见图 5(单位:距离 m,速度 m/s,加速度 m/s^2),滤波前后精度比较见表 1。

仿真曲线显示,系统在噪声干扰下速度和加速度都呈现极不稳定的状态,系统的风险性高。经自适应 Kalman 滤波后,当 $r = 10$ 阶段时,系统反应迅速,超调大,僚机朝相反方向紧急机动,禁止飞机发生碰撞,扩

大双机相对距离。当 $r>10\text{m}$ 一段时间之后,飞机处于安全距离时,速度,加速度变化曲线缓和,保持稳定状态。由对比图可知,在实验运行过程中,滤波后的速度和加速度精度比未滤波时增加了一个数量级,且收敛效果明显。实验结果证明了自适应 Kalman 滤波实时性强,稳定性好,鲁棒性高,具有很好的可靠性。

表 1 滤波前后误差精度对比图

误差	距离 m	速度 m/s	加速度 m/s^2
滤波前	4	4.8	8
滤波后	1	0.14	0.1

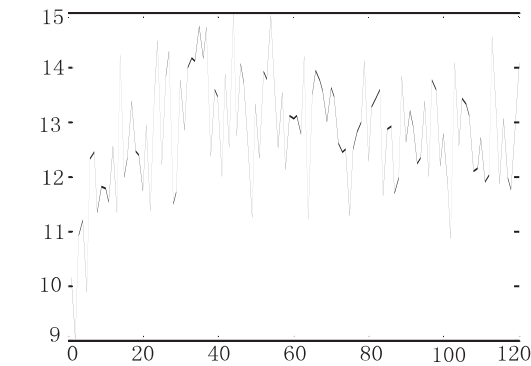


图 3 机间距离

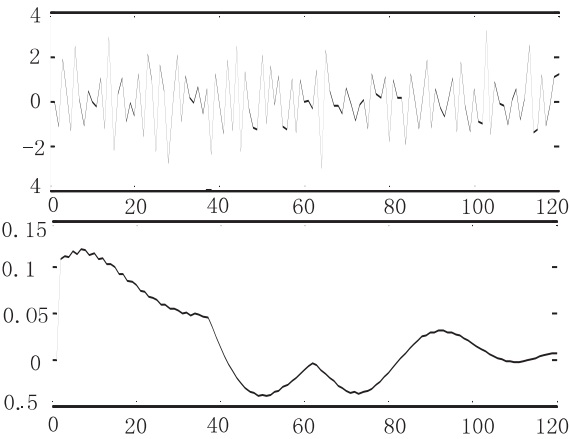


图 4 滤波前后速度对比图

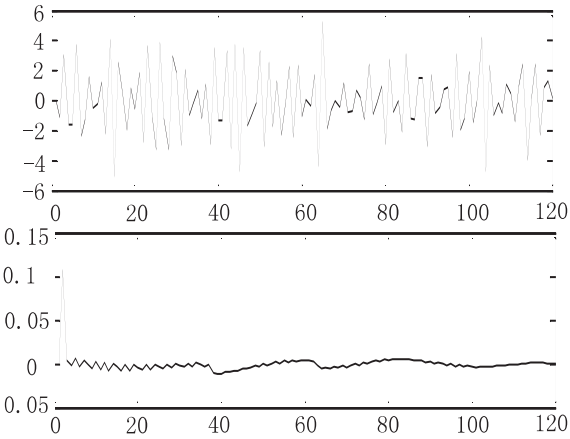


图 5 滤波前后加速度对比图

4 结束语

文中提出了双无人机编队飞行时的自适应 Kalman 滤波防撞算法,防撞算法只考虑僚机上一拍机动状态,不需要存储过去所有测量值,减少了计算量,改善了实时性。搭建了半物理仿真平台,用 Zigbee 实行无线通讯,使用了超声波机间测距方式,不受传统低导航精度的影响。

实验表明,作为时变系统的无人机防撞系统,当系统中的过程噪声和观测噪声为高斯白噪声时,自适应 Kalman 滤波算法具有较好的滤波特性,有效抑制发散,提高了鲁棒性。

文中对以后的多机防撞系统的设计给出了一种思路,同时也为无人机编队控制的研究提供了参考,具有一定的工程应用价值。

参考文献:

[1] Su Jijie, Zheng Xing, Sun Ye, et al. The Hardware-in-the-Loop-Simulation for UAV Training System[J]. Fire Control and Command Control, 2009(10):153-155.

[2] 王军政,陈超,汪正军,等. 基于 Kalman 滤波的量程自适应超声波测距[J]. 北京理工大学学报, 2011, 31(3):283-288.

[3] 辛国柏,卢京潮,闫建国,等. 一种小型无人机半物理仿真系统实现[J]. 计算机仿真, 2008(6):66-69.

[4] 龚耀寰. 自适应滤波-时域自适应滤波和智能天线[M]. 北京:电子工业出版社, 2003.

[5] Haykin S. Adaptive Filter Theory[M]. 4th ed. 北京:电子工业出版社, 2006.

[6] 常国宾,许江宁,常路宾,等. 一种新的鲁棒非线性卡尔曼滤波[J]. 南京航空航天大学学报, 2011, 43(6):754-759.

[7] 董健康,安东. 自适应卡尔曼滤波在组合导航中的应用研究[J]. 计算机技术与发展, 2011, 21(10):183-185.

[8] Rigatos G G. A Derivative-Free Kalman Filtering Approach to State Estimation-Based Control of Nonlinear Systems[J]. IEEE Transaction on Industrial Electronics, 2012, 59(10):3987-3997.

[9] Choi Young-Seok. Noise Constrained Data-Reusing Adaptive Algorithms for System Identification[J]. IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, 2012, E95-A(6):1084-1087.

[10] Xu Pan. An Adaptive Approach to Dealing with Unstable Behavior of Users in Collaborative Filtering Systems[J]. Journal of Information Science, 2012, 38(3):205-221.

[11] 贾秋玲. 基于 MATLAB 7. X/Simulink/Stateflow 系统仿真、分析及设计[M]. 西安:西北工业大学出版社, 2006.

基于自适应滤波的无人机编队防碰撞系统研究

作者：[付幼明](#)，[闫建国](#)，[屈耀红](#)，[朱旭](#)
作者单位：[西北工业大学 自动化学院, 陕西 西安710129](#)
刊名：[计算机技术与发展](#)
英文刊名：[Computer Technology and Development](#)
年，卷(期)：2013(4)

本文链接：http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_wjtz201304064.aspx