

卡尔曼滤波在陀螺稳定吊舱控制中的应用

刘 斌^{1,2}, 王常虹¹, 蔡美华¹, 李 伟¹

(1. 哈尔滨工业大学 空间控制与惯性技术研究中心, 哈尔滨 150001, liuzhen8936@yahoo.com.cn;

2. 大庆石油学院 电气信息工程学院, 黑龙江 大庆 163318)

摘 要: 通过对当前流行的控制方法进行比较, 采用变结构控制的原理对系统控制器进行设计. 以典型的两轴四框架结构吊舱系统的内俯仰框架为控制对象, 设计了一种基于 Kalman 滤波器的滑模变结构控制方案. 当过程噪声和量测噪声较大时, 针对不同形式的跟踪信号, 对有无滤波器两种控制方案的跟踪效果进行了比较. 仿真结果表明, 采用基于 Kalman 滤波器的滑模变结构, 系统的跟踪性能较没有 Kalman 滤波器的跟踪性能有明显的改善, 提高了系统跟踪精度.

关键词: 航空光电吊舱; 滑模控制; 卡尔曼滤波; 陀螺稳定系统

中图分类号: TP273

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2010)07-1025-04

The controller based on Kalman filter designed for gyro stabilized pod

LIU Bin^{1,2}, WANG Chang-hong¹, CAI Mei-hua¹, LI Wei¹

(1. Space Control and Inertial Technology Research Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China, liuzhen8936@yahoo.com.cn; 2. Electrical and Information Engineering College, Daqing Petroleum Institute, Daqing 163318, China)

Abstract: A high performance controller was designed based on variable structure control (VSC) theory in this paper. The control plant is the typical structure of two axes and four frames, and the controller is sliding mode controller based on Kalman filtering. Comparisons between the controller with filter and the controller without filter were made through tracking different signals when process noise and sensor noise were obvious. The results show that the tracking performance is improved by variable structure control scheme based on Kalman filter, and the accuracy of tracking is enhanced.

Key words: airborne optoelectronic pod; sliding mode control; Kalman filtering; gyro stabilized sighting system

陀螺稳定吊舱近几年来发展十分迅速, 被广泛用于军事领域和公安、消防及环境监控等民用领域^[1]. 陀螺稳定吊舱的主要任务是隔离平台外部扰动的影响, 保持视线轴在惯性空间的稳定, 同时实现对机动目标的捕获和跟踪. 稳定回路是其控制系统的重要组成部分, 用于隔离载体扰动, 补偿摩擦力矩、消除各种过程噪声和量测噪声等因素的影响, 实现视轴跟踪和稳定的功能. 吊舱工作环境恶劣, 载机的姿态变化、高频振动和飞行中的风阻力矩等都会造成视轴指向不稳定, 从而对吊

舱中观测设备的清晰成像产生显著影响. 为了克服这些影响, 必须在吊舱控制系统中设计一个稳定回路, 隔离载体扰动, 使光电探测器的视轴稳定在固定的惯性空间方向, 从而达到良好的跟踪效果. 同时, 稳定回路作为跟踪回路的内回路, 它的设计好坏直接影响着吊舱中光电系统的跟踪性能. 因此, 在进行稳定回路设计时必须采用先进的控制方法, 搭配合理的视轴稳定结构, 以提高吊舱系统的稳定精度.

本文以两轴四框架结构吊舱系统的内俯仰框架为控制对象, 设计了一种基于 Kalman 滤波器的滑模变结构控制系统. 针对两种不同形式的跟踪信号, 对有无滤波器两种控制方案的跟踪效果进行了比较.

收稿日期: 2009-06-10.

基金项目: 国防预研项目(5130904201).

作者简介: 刘 斌(1981—), 男, 博士研究生;

王常虹(1961—), 男, 教授, 博士生导师.

1 陀螺稳定吊舱的数学模型及控制方案

1.1 陀螺稳定吊舱的数学模型

采用两轴四框架结构的吊舱系统,两个轴系的稳定回路组成基本相同,分别包括稳定控制器、电机驱动电路、直流力矩电机、速率陀螺等.以内俯仰框架为例,其稳定回路的各组成环节及其数学模型如图 1 所示.

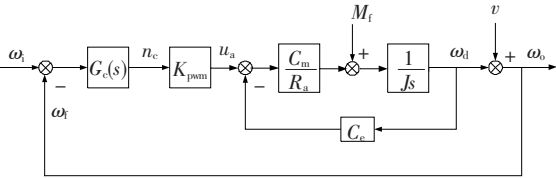


图 1 内俯仰框架单速率稳定回路数学模型

图中 $G_c(s)$ 是校正环节的传递函数, M_f 表示过程噪声或是干扰, v 表示量测噪声. 经过整理得到被控对象的开环传递函数, 近似为 $G_o(s) = 4.545/(0.05s + 1)$.

影响上述跟踪系统精度的一个重要因素是摩擦干扰力矩的存在,它也是造成跟踪系统具有非线性特性的主要因素之一. 一般情况下,控制器设计通常没有考虑摩擦非线性的存在对整个系统稳定性造成的影响. 随着跟踪系统对控制精度要求的提高,摩擦非线性已经成为一个不可忽略的重要问题. 从实际的角度出发,通常认为摩擦非线性相当于执行机构中存在死区,从而形成系统的稳态误差^[2]. 从运动过程来看,机械摩擦导致系统在低速运行情况下产生“爬行”现象,甚至引起极限环振荡^[3]. 为了抑制摩擦的影响,通常采用低摩擦机器的设计、润滑的选择以及摩擦力矩的动态补偿等方法,从而保证系统的稳定性和精度^[4-6].

本文将载体在方位和俯仰方向上由于摩擦的存在而耦合到跟踪架各轴上的非线性干扰视为外部扰动力矩,这样进行控制系统设计时,只需把摩擦作为一个干扰加以抑制.

1.2 内俯仰框架单速率稳定回路的滑模控制

目前在稳定回路的控制中,经典控制技术仍处于主导地位. 随着控制技术的发展,在惯性稳定系统中产生了各种控制方案,如神经网络控制^[7-8]、模糊控制^[9]、 H^∞ 控制^[10] 以及最优控制^[11] 等,并且它们已逐渐被应用于机载稳定平台的控制中.

滑模变结构控制是变控制系统的一种控制策略^[12]. 这种控制策略与常规控制的根本区别在于控制的不连续性. 该控制特性可以迫使系统在一定特性下沿规定的状态轨迹作小幅度、高频率的

上下运动,即所谓的“滑动模态”或“滑模”运动. 这种滑动模态是可以设计的,且与系统的参数及扰动无关. 它是通过切换函数实现的,一个控制系统可以设计若干个切换函数. 若系统切换面(子空间)上存在滑动模态区,当系统的状态向量所决定的切换函数值随着它的运动达到某特定值(不失一般性取为零)时,系统中一种结构(运动微分方程)转变成另一种结构. 这样,处于滑模运动的系统就具有很好的鲁棒性.

但是,吊舱的工作环境比较恶劣,由于强电磁干扰、测量装置自身及数据传输过程中的种种原因,整个控制系统中不可避免地包含有过程噪声、量测噪声等干扰,因此有必要选取合适的方法对信号进行处理,从而实现准确跟踪的目的.

2 基于 Kalman 滤波器的滑模控制器设计

在实际问题中,形成最优控制率所需的状态变量需要通过测量装置进行观测. 由于测量装置中一般都存在随机干扰,因此在观测得到的信号中往往夹杂有随机噪声,要从夹杂有随机噪声的观测信号中准确地分离出状态变量是不可能的,只能根据观测信号来估计和预测这些状态变量,这就是所谓的 Kalman 滤波问题^[13-14].

2.1 Kalman 滤波器

设离散系统模型为

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= \Phi(k+1, k)\mathbf{x}(k) + \mathbf{G}(k+1, k)\mathbf{u}(k) + \mathbf{I}(k+1, k)\mathbf{w}(k), \\ \mathbf{z}(k) &= \mathbf{H}(k)\mathbf{x}(k) + \mathbf{v}(k). \end{aligned} \tag{1} \tag{2}$$

式中: $\mathbf{w}(k)$ 和 $\mathbf{v}(k)$ 都是均值为零的白噪声序列, $\mathbf{w}(k)$ 和 $\mathbf{v}(k)$ 互相独立,在采样间隔内都为常值,其统计特性如下:

$$\begin{aligned} E[\mathbf{w}(k)] &= E[\mathbf{v}(k)] = 0, \\ E[\mathbf{w}(k)\mathbf{w}^T(j)] &= \mathbf{Q}_k\delta_{kj}, \\ E[\mathbf{v}(k)\mathbf{v}^T(j)] &= \mathbf{R}_k\delta_{kj}, \\ E[\mathbf{w}(k)\mathbf{v}^T(j)] &= 0. \end{aligned}$$

式中: δ_{kj} 为 Kroneker δ 函数, 其特性为: $\delta_{kj} = \begin{cases} 1 & k = j \\ 0 & k \neq j \end{cases}$; $\mathbf{Q}_k$ 和 $\mathbf{R}_k$ 都是方差阵且 $\mathbf{Q}_k$ 为非负定矩阵, $\mathbf{R}_k$ 为正定矩阵.

由方程(1)~(2)表示的离散系统的 Kalman 滤波器为

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}(k+1|k+1) &= \hat{\mathbf{x}}(k+1|k) + \mathbf{K}(k+1)[\mathbf{z}(k+1) - \mathbf{H}(k+1)\hat{\mathbf{x}}(k+1|k)], \\ \hat{\mathbf{x}}(k+1|k) &= \Phi(k+1, k)\hat{\mathbf{x}}(k|k), \\ \mathbf{K}(k+1) &= \mathbf{P}(k+1|k)\mathbf{H}^T(k+1)[\mathbf{H}(k+1)\mathbf{P}(k+1|k)\mathbf{H}^T(k+1) + \mathbf{R}_{k+1}]^{-1}, \end{aligned} \tag{3} \tag{4} \tag{5}$$

$$\begin{aligned} P(k+1|k+1) &= P(k+1|k) - P(k+1|k)H^T(k+1)[H(k+1)P(k+1|k)H^T(k+1) + R_{k+1}]^{-1}H(k+1)P(k+1|k) \\ &\quad + K(k+1)K^T(k+1) + K(k+1)R_{k+1}K^T(k+1), \end{aligned} \tag{6}$$
$$\begin{aligned} P(k+1|k) &= E[\tilde{x}(k+1|k)\tilde{x}^T(k+1|k)] = \Phi(k+1,k)P(k|k)\Phi^T(k+1,k) + \\ &\quad I(k+1,k)Q_kI^T(k+1,k). \end{aligned} \tag{7}$$

式(3)~(7)构成了 Kalman 最优滤波方程.

2.2 基于 Kalman 滤波器的滑模控制系统设计

以内俯仰框架单速率稳定回路为例, 基于 Kalman 滤波器的滑模控制器结构如图 2 所示.

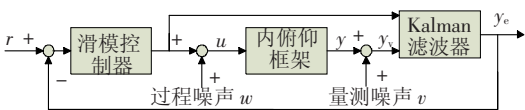


图 2 带有 Kalman 滤波器的内俯仰框架控制系统结构

在图 2 所示的内俯仰框架控制系统中, 令指令信号 $r = 0$, 加入幅值为 $5\text{ N}\cdot\text{m}$, 频率为 1.5 Hz 的方波力矩干扰信号. 观察系统的输出曲线图 3 可以发现, 跟踪信号在较短的时间内, 迅速回到 0 位置. 这说明该系统具有较好的抗干扰性.

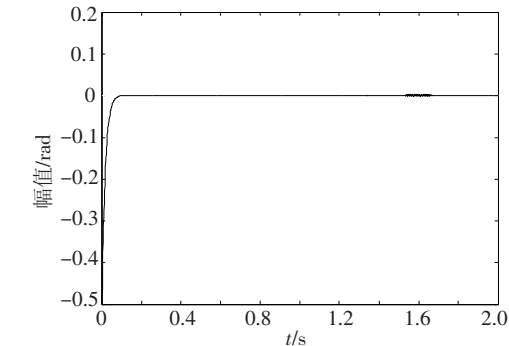
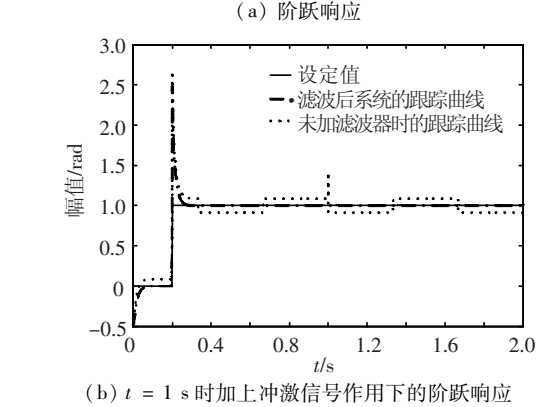
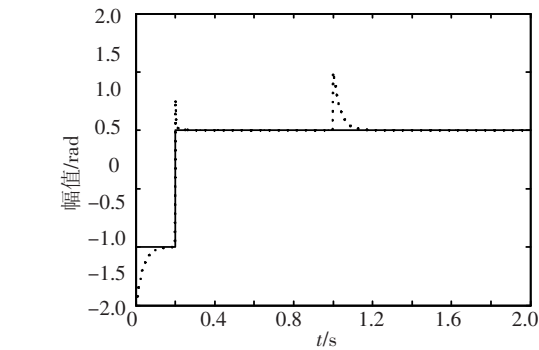


图 3 干扰力矩作用下系统输出角偏差

由图 4(a) 所示系统的阶跃响应可以看出, 在 $t = 0.2\text{ s}$ 时突然给系统加上一个单位阶跃信号, 跟踪系统能够在超调量约为 25% 的情况下, 具有较短的过渡时间. 若在 $t = 1\text{ s}$ 时给系统加上一个冲激信号, 则系统能够在较短的时间内迅速回到设定值上来. 由此可知, 该跟踪系统能够在较短的时间内克服干扰, 快速回到设定的跟踪信号上. 由图 4(b) 可看出, 未加 Kalman 滤波器时, 跟踪系统的输出对于干扰力矩的存在具有很大的周期性跟踪误差. 若对此进行 Kalman 滤波, 其后的跟踪曲线是十分理想的. 此时跟踪系统不仅对方波干扰力矩具有较强的抑制能力, 而且对于 $t = 1\text{ s}$ 时突然加上的冲激信号也有很好的抑制效果.

若指令信号分别取为正弦信号和时变的正弦信号, 即 $r_1 = \sin(2\pi t)$ 、 $r_2 = t + \sin(2\pi t)$. 过程噪声 $w(k)$ 是幅值为 1 的白噪声信号, 测量噪声 $v(k)$ 是幅值为 0.5 的白噪声信号. 由于吊舱的光

电系统存在时延, 故在仿真过程中, 针对有无时延环节两种情况进行了实验.

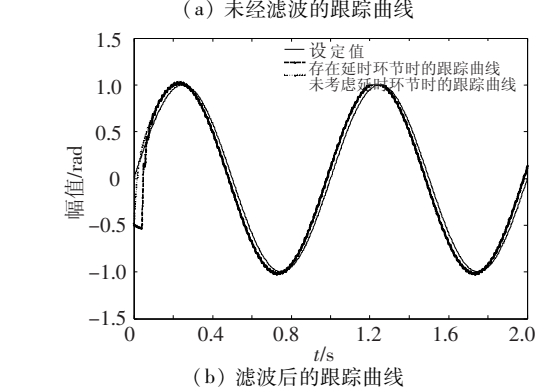
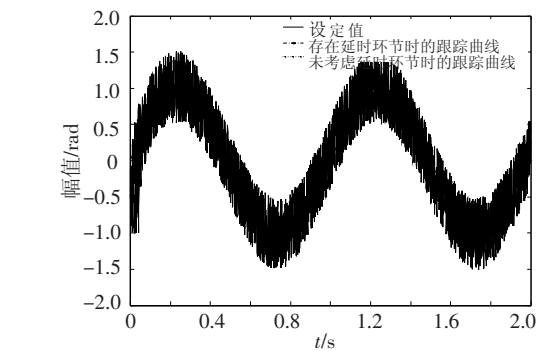


(a) 阶跃响应

(b) $t = 1\text{ s}$ 时加上冲激信号作用下的阶跃响应

图 4 阶跃响应及冲激信号存在时的阶跃响应

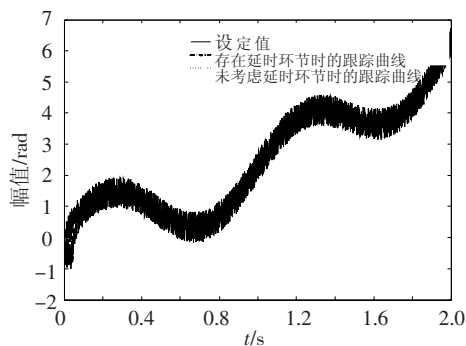
从图 5(a), 图 6(a) 可以看出, 当控制系统中不含有 Kalman 滤波器时, 内俯仰框架的跟踪效果极差, 测量信号几乎完全被过程噪声和量测噪声所淹没. 从中只能发现内俯仰框架输出跟踪信号的变化趋势, 但是其真值淹没在噪声中. 由图 5(b), 图 6(b) 可见, 经过 Kalman 滤波后, 内俯仰



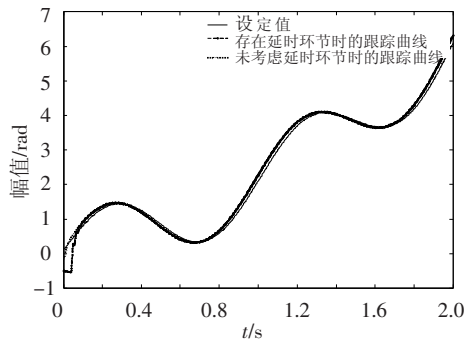
(a) 未经滤波的跟踪曲线

(b) 滤波后的跟踪曲线

图 5 设定为 r_1 的系统跟踪曲线



(a) 未经滤波的跟踪曲线



(b) 滤波后的跟踪曲线

图6 设定为 r_2 的系统跟踪曲线

框架可以精确跟踪设定信号. 通过观察内俯仰框架的输出信号可以发现, 考虑时延环节的跟踪曲线较未考虑时延环节的跟踪曲线在前 200 ms 有轻微的抖动, 此后跟踪效果两者相差不大, 均能满足设计要求.

3 结 论

在方波干扰力矩存在的条件下, 跟踪系统的偏差可以控制在允许的范围内. 若考虑此类光电跟踪系统的延时, 则跟踪信号经过短时间的过渡之后, 可以及时的跟踪设定值, 并具有较高的跟踪精度. 这表明该方法能够克服随机测量噪声的影响, 具有良好的跟踪性能和鲁棒性能, 可以实现对目标的快速准确跟踪, 从而为自动跟踪系统控制的实现提供了一种有效的方法.

参考文献:

- [1] LOH M K. Design, development and control of a LOS stabilization system [D]. Singapore: National University of Singapore, 1991.
- [2] AMIN J, FRIEDLAND B, HARNOY A. Implementation of a friction estimation and compensation technique[J]. IEEE Control Systems, 1997, 17(4): 71 – 76.

- [3] ADAMS J, PAYANDEH S. Methods for low velocity friction compensation: theory and experiments [J]. Journal of Robotic Systems, 1996, 13 (6): 391 – 404.
- [4] ARMSTRONG-HELOUVRY B, DUPONT P, CANUDAS C, *et al.* A survey of models, analysis tools and compensation methods for the control of machines with friction[J]. Automatica, 1994, 30(7): 1083 – 1138.
- [5] ARMSTRONG-HELOUVRY B. Control of Machines with Friction [M]. Massachusetts: Kluwer Academic Publishers, 1991.
- [6] SWEVERS J, AL-BENDER F, GANSEMAN C G. An integrated friction model structure with improved presliding behavior for accurate friction compensation [J]. IEEE Transaction on Automatic Control, 2000, 45 (4): 675 – 686.
- [7] BAE Y G, PARK J K, JEON H W, *et al.* Neural network control for image stabilization system on helicopter in remote sensing [C]//SICE – ICASE International Joint Conference. Bucheon-City: SICE-ICASE, 2006: 5169 – 5172.
- [8] LEE T H, GE S S, WONG C P. Adaptive neural network feedback control of a passive line of sight stabilization system[J]. Mechatronics, 1998 (8): 887 – 903.
- [9] BUSKEY G, WYETH G, ROBERTS J. Autonomous helicopter hover using an artificial neural network[C]//Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics & Automation. Seoul: IEEE, 2001: 1635 – 1640.
- [10] KRISHNA MOORTY J A R, MARATHE R, SULE V R. H_∞ control law for line-of-sight stabilization for mobile land vehicles[J]. Optical Engineering, 2002, 41 (11): 2935 – 2944.
- [11] KRISHNA MOORTY J A R, MARATHE R. LQG/LTR control law for a wideband controller for line of sight stabilisation for mobile land vehicles[C]//Proceedings of International Conference on Electro-Optics. New Delhi: IEEE, 1999: 729 – 735.
- [12] PERRUQUETTI W, BARBOT J P. Sliding mode control in engineering [M]. New York: Marcel Dekker, 2002.
- [13] KALMAN R E. A new approach to linear filtering and prediction theory [J]. Trans. ASME. Journal of Basic Eng, 1960, 82D: 35 – 45.
- [14] MARCELO C A, DOUGLAS E E. Novel kalman filtering method for the suppression of gyroscope noise effects in pointing and tracking systems[J]. Optical engineering, 1995, 34(10): 3016 – 3030.

(编辑 张 宏)