

## 全景式航空相机的离散滑模控制

张雪菲<sup>1,2</sup>, 丁亚林<sup>1</sup>, 李昕阳<sup>1,2</sup>, 陈志超<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 航空光学成像与测量重点实验室; 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 为了提高全景式航空相机镜筒速度控制系统的动态特性, 使其具有响应速度快且超调小的特点, 本文提出一种基于降维状态观测器的离散滑模控制方法, 对镜筒角速度、角加速度进行观测, 并对其速度系统进行控制. 针对高氏趋近律带来的控制抖振和稳态抖振问题, 本文采用幂次函数趋近律的方法, 并对这种方法进行了无抖振理论分析以及稳定性证明. 最后以某全景式航空相机作为实验平台, 将基于幂次函数趋近律的离散滑模控制应用到镜筒速度控制系统中. 实验结果表明, 本文提出的控制方法能够有效地减小系统的抖振, 使镜筒速度控制系统表现出良好的动态品质.

**关键词:** 全景式航空相机; 降维状态观测器; 角速度; 角加速度; 趋近律; 离散滑模控制

**中图分类号:** TP273      **文献标识码:** A

## Discrete-time sliding-mode control in panoramic aerial camera

ZHANG Xue-fei<sup>1,2</sup>, DING Ya-lin<sup>1</sup>, LI Xin-yang<sup>1,2</sup>, CHEN Zhi-chao<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement; Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun Jilin 130033, China;

2. Graduate School, Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China)

**Abstract:** A discrete-time sliding-mode control method based on reduced-order state observer is proposed to provide fast response and small overshoot for the drawtube control system of a panoramic aerial camera. In this method, the angular velocity and acceleration of the camera are measured for controlling the velocity system, and a power-function reaching law is proposed to substitute the conventional reaching law for suppressing the control chattering and the steady-state chattering caused by the conventional reaching law. The non-chattering characteristics and the system stability are analyzed theoretically. This controller has been applied to control the drawtube system of a panoramic aerial camera on an experimental platform; the experiment results show that this control scheme can effectively eliminate the chattering and make the drawtube system achieve desired dynamical performances.

**Key words:** panoramic aerial camera; reduced-order state observer; angular velocity; angular acceleration; reaching law; discrete-time sliding-mode control

### 1 引言(Introduction)

全景式航空相机<sup>[1-3]</sup>是一种基于线阵电荷耦合元件(charge-coupled device, CCD)器件、对地面景物采用摆扫方式成像的航空相机. 拍照时, 镜筒控制器控制镜筒以恒定的扫描角速度对地面景物进行扫描, 保证CCD以固定的行转移频率和重叠率成像; 拍照结束时, 镜筒返回到拍照初始位置, 等待下一次指令的到来. 一个拍照周期由拍照准备时间和拍照时间两部分组成. 拍照准备时间主要为镜筒稳速前的过渡时间, 如果镜筒速度控制系统的快速性越好, 其过渡过程越短, 则相机摄像时间越长, 使相机视场相对扩大, 进而保证相机拍摄到更多的图像信息. 因此, 提高镜筒速度控制系统的动态特性对保证相机

视场、重叠率等有着重要作用.

航空相机镜筒的速度控制一般采用超前-滞后的有源校正方法<sup>[4-5]</sup>, 这种方法能实现较高的增益, 提高系统的带宽和稳态性能. 但是如果系统的前向通道的参数发生变化时, 很难改善系统对变化参数的灵敏度. 由于超前的时间常数和滞后的时间常数相互产生耦合, 也将给调试带来很大难度. 随着数字信号处理技术的不断发展, 以现代控制理论为基础的离散滑模控制应用越来越广泛. 许多在模拟控制方式下无法实现的先进控制算法<sup>[6-8]</sup>, 如模型参考自适应控制、滑模变结构控制、模糊控制、自抗扰控制等都应用到航空相机镜筒速度和位置控制中. 离散滑模控制是一种基于现代控制理论、适用于数字信号处理

芯片实现的控制方法,它具有响应速度快且超调小的特点.针对离散滑模控制的抖振问题,国内外学者们提出多种新的趋近律<sup>[9-14]</sup>,如修正的离散指数趋近律、离散变速趋近律、离散自适应趋近律和基于幂次函数的离散趋近律等,在削弱抖振方面取得了良好的效果.离散滑模控制在速度控制应用中需要被控系统的角速度和角加速度信息作为输入量.实际中,某全景式航空相机由于机身空间限制以及成本等原因没有安装角加速度计,使得镜筒的角加速度值无法直接测量.而采用角速度信号差分运算和低通滤波器相结合的方法虽然可以估计角加速度值,但是低通滤波器在抑制高频噪声的同时又会带来相位的延迟,使得滤波后的角加速度与实际角加速度相比存在时间滞后.

因此,本文以现代控制理论为基础,设计某全景式航空相机镜筒控制系统的降维状态观测器,利用镜筒角度编码器测量的角度信息对镜筒的角速度、角加速度进行实时观测.采用基于幂次函数趋近律的离散滑模控制方法,使镜筒控制系统的动态和稳态性能得到了明显的提高.

## 2 降维状态观测器(Reduced-order state observer)

### 2.1 镜筒控制系统模型建立(Mathematic model of drawtube control system)

本文采用频域法对镜筒控制系统的频率特性进行测试,利用DSP TMS320F2812处理器产生幅值相同频率不同的正弦脉冲调制信号,通过功率放大电路输入到镜筒电机上,电机输出的角速度由光纤陀螺测量.镜筒速度控制系统的开环幅频特性曲线如图1所示.

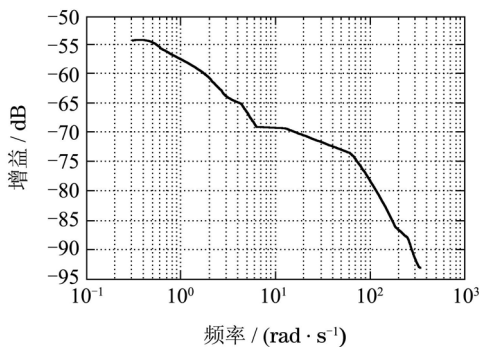


图1 镜筒速度控制系统开环幅频特性曲线

Fig. 1 The chart of open-loop frequency response characteristics of drawtube velocity control system

从图1可知,镜筒速度控制系统可看成由两个惯性环节串联构成,由转折频率和增益可以确定带负载的镜筒速度控制系统的传递函数为

$$G_v(s) = \frac{\dot{\theta}_M(s)}{U_a(s)} = \frac{0.00199}{(0.152s + 1)(0.005s + 1)}, \quad (1)$$

其中:  $\dot{\theta}_M(s)$  为镜筒电机输出角速度,  $U_a(s)$  为由 DSP TMS320F2812 处理器产生的 PWM 脉冲调制的输入量码值.

根据式(1)可得镜筒位置控制系统的传递函数为

$$G_L(s) = \frac{G_v(s)}{s} = \frac{\theta_M(s)}{U_a(s)} = \frac{0.00199}{(0.152s + 1)(0.005s + 1)s}, \quad (2)$$

其中  $\theta_M(s)$  为镜筒电机输出的角度,可由镜筒角度编码器测量.

### 2.2 降维状态观测器的设计(The design of reduced-order state observer)

状态观测器是采用状态重构的思想,利用被控对象的输入和输出信息来重构系统的状态.当重构的状态向量的维数等于被控对象状态向量的维数时,称为全维状态观测器.而在实际系统中,由于系统的一部分状态变量可以直接测量得到,只要设计状态观测器对其余变量进行观测即可.降维状态观测器具有结构简单、计算量小、更符合工程需要的特点.因此,本文通过镜筒角度编码器测量的镜筒角度信息设计降维状态观测器,对镜筒的角速度和角加速度状态变量进行观测.

由式(2)可知,镜筒位置控制系统为三阶系统,其离散系统状态方程为

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k), \\ y(k) &= Cx(k) + Du(k), \end{aligned} \quad (3)$$

其中:  $u(k)$  为由 DSP TMS320F2812 处理器产生的 PWM 脉冲调制的输入量码值,  $y(k)$  为镜筒角度编码器反馈的镜筒转动角度值;  $x(k) = [\theta_M(k) \quad \dot{\theta}_M(k) \quad \ddot{\theta}_M(k)]^T$ ,  $\theta_M(k)$  为  $k$  时刻镜筒转动角度,  $\dot{\theta}_M(k)$  为  $k$  时刻镜筒的角速度,  $\ddot{\theta}_M(k)$  为  $k$  时刻镜筒的角加速度,

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0.001 & 0 \\ 0 & 0.9994 & 0.0009 \\ 0 & -1.1881 & 0.8133 \end{bmatrix},$$

$$B = [0 \ 0 \ 0.0024]^T, \quad C = [1 \ 0 \ 0], \quad D = 0.$$

镜筒位置控制系统的可观矩阵  $W_o$  的秩为  $\text{rank } W_o = 3$ ,说明该系统是完全可观测系统,因此存在状态观测器.

将镜筒位置控制系统状态向量分解成两部分,即

$$x(k) = \begin{bmatrix} X_1(k) \\ X_2(k) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

其中:  $X_1(k) = \theta_M(k)$ , 为该系统可直接测量的状态向量;  $X_2(k) = [\dot{\theta}_M(k) \quad \ddot{\theta}_M(k)]^T$ , 为二维系统不可直接测量的状态向量.于是镜筒位置控制系统离散状

态方程可以写成分块形式, 即

$$x(k+1) = \begin{bmatrix} X_1(k+1) \\ X_2(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1(k) \\ X_2(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} u(k), \quad (5)$$

式中:

$$\begin{aligned} A_{11} &= 1, \quad A_{12} = [0.001 \ 0], \\ A_{21} &= [0 \ 0]^T, \quad A_{22} = \begin{bmatrix} 0.9994 & 0.0009 \\ -1.1881 & 0.8133 \end{bmatrix}, \\ B_1 &= 0, \quad B_2 = [0 \ 0.0024]^T. \end{aligned}$$

镜筒位置控制系统不可观测状态 $X_2(k)$ 的降维状态观测器方程为

$$\begin{aligned} \hat{X}_2(k+1) &= (A_{22} - KA_{12})\hat{X}_2(k) + (A_{21} - KA_{11})X_1(k) + (B_2 - KB_1)u(k) + KX_1(k+1), \quad (6) \end{aligned}$$

式中 $K$ 为降维状态观测器的反馈增益向量.

降维观测器的重构误差方程为

$$\begin{aligned} \tilde{X}_2(k+1) &= X_2(k+1) - \hat{X}_2(k+1) = (A_{22} - KA_{12})[X_2(k) - \hat{X}_2(k)] = (A_{22} - KA_{12})\tilde{X}_2(k) = \Phi\tilde{X}_2(k), \quad (7) \end{aligned}$$

只需 $K$ 的选取使 $\Phi$ 的特征值全部在单位圆内, 则降维状态观测器稳定. 通过调节矩阵 $\Phi$ 的特征根在单位圆内的位置来控制误差收敛的速度.

### 3 离散滑模控制(Discrete-time sliding-mode control)

在离散时间系统中, 受有限采样频率存在及离散趋近律参数的影响, 系统状态很难在滑模面上做理想的滑模运动, 只能在滑模面的某一邻域内作准滑模运动, 并同时伴有控制抖振和稳态抖振产生. 采用幂次函数趋近律<sup>[10]</sup>可以有效消除抖振.

幂次函数 $\text{fal}(s, a, \delta)$ 是一种非线性函数, 可以看成是在原点附近具有线性段的连续的幂次函数, 利用它可以产生许多智能性的功能, 表达式为

$$\text{fal}(s, a, \delta) = \begin{cases} |s|^a \text{sgn } s, & |s| \geq \delta, \\ \frac{s}{\delta^{1-a}}, & |s| < \delta, \end{cases} \quad (8)$$

其中:  $0 < \alpha < 1, 0 < \delta < 1$ .

利用幂次函数设计的新型离散趋近律为

$$\begin{cases} s(k+1) = (1 - qT)s(k) - \varepsilon T \text{fal}(s, a, \delta), \\ \delta > \left(\frac{\varepsilon T}{1 - qT}\right)^{\frac{1}{1-a}}, \quad 0 < \frac{\varepsilon T}{1 - qT} < 1. \end{cases} \quad (9)$$

### 3.1 无抖振性分析(Non-chattering analysis)

对于线性离散系统的线性滑模面设计为

$$s(k) = C_e x(k). \quad (10)$$

假设可控条件 $C_e B \neq 0$ 成立, 系统的控制律为

$$u(k) = -(C_e B)^{-1} [C_e A x(k) - (1 - qT)s(k) + \varepsilon T \text{fal}(s(k), a, \delta)]. \quad (11)$$

将控制律施加于被控对象时有

$$\begin{aligned} s(k+1) &= C_e x(k+1) = C_e A x(k) + C_e B u(k) = (1 - qT)s(k) - \varepsilon T \text{fal}(s(k), a, \delta). \quad (12) \end{aligned}$$

下面分析切换函数的收敛域.

1) 当 $s(k) \geq \delta$ 时,

$$s(k+1) = [(1 - qT) - \varepsilon T s(k)^{\alpha-1}]s(k). \quad (13)$$

设 $\Delta s(k) = s(k+1) - s(k)$ , 则有

$$\Delta s(k) = -qT s(k) - \varepsilon T s(k)^\alpha \leq 0. \quad (14)$$

由 $\Delta s(k) \leq 0$ 可知 $s(k)$ 递减, 即: 当 $s(k) \geq \delta$ 时,  $s(k)$ 递减, 直到进入 $0 \leq s(k) < \delta$ 的范围.

2) 当 $0 \leq s(k) < \delta$ 时,

$$s(k+1) = (1 - qT - \varepsilon T \delta^{\alpha-1})s(k). \quad (15)$$

$\Delta s(k)$ 表达式为

$$\Delta s(k) = (-qT - \varepsilon T \delta^{\alpha-1})s(k) \leq 0. \quad (16)$$

由 $\Delta s(k) \leq 0$ 可知 $s(k)$ 递减, 即: 当 $0 \leq s(k) < \delta$ 时,  $s(k)$ 递减, 直到进入 $s(k) < 0$ 的范围.

3) 当 $s(k) \leq -\delta$ 时,  $\Delta s(k)$ 表达为式(14), 当 $s(k) \leq -\delta$ 时, 有

$$\Delta s(k) \geq -qT\delta - \varepsilon T s^\alpha \geq 0. \quad (17)$$

由 $\Delta s(k) \geq 0$ 可知 $s(k)$ 递增, 即 $s(k) \leq -\delta$ 时,  $s(k)$ 递增, 直到进入 $-\delta < s(k) < 0$ 的范围.

4) 当 $-\delta < s(k) < 0$ 时,  $\Delta s(k)$ 表达为式(16), 当 $-\delta < s(k) < 0$ 时, 有

$$\Delta s(k) > -\varepsilon T \delta^{\alpha-1} s \geq 0. \quad (18)$$

由 $\Delta s(k) \geq 0$ 可知 $s(k)$ 递增, 即: 当 $-\delta < s(k) < 0$ 时,  $s(k)$ 递增, 直到进入 $s(k) \geq 0$ 的范围.

令 $D = 1 - qT - \varepsilon T \delta^{\alpha-1}$ , 则当 $|s(k)| < \delta$ 时, 有 $s(k+1) = Ds(k)$ , 显然 $D < 1$ .

根据式(8)-(9)中的 $0 < \alpha < 1, 0 < \frac{\varepsilon T}{1 - qT} < 1, \delta > \left(\frac{\varepsilon T}{1 - qT}\right)^{\frac{1}{1-\alpha}}$ , 可得

$$D > 1 - qT - \varepsilon T \left(\left(\frac{\varepsilon T}{1 - qT}\right)^{\frac{1}{1-\alpha}}\right)^{\alpha-1} = -1, \quad (19)$$

因此 $|D| < 1$ ,  $|s(k+1)| < |s(k)|$ , 即 $|s(k)|$ 是单调递减的.

综上, 只要满足 $0 < \alpha < 1$ ,  $0 < \frac{\varepsilon T}{1 - qT} < 1$ ,  $\delta > (\frac{\varepsilon T}{2 - qT})^{\frac{1}{1-\alpha}}$ 可以得到以下结论:

- 1)  $s(k)$ 以无抖振的方式趋近于零, 而且当 $|s(k)| < \delta$ 时,  $s(k)$ 幅值递减比例为 $D$ .
- 2)  $s(k)$ 单调递减至零, 不会出现 $s(k)$ 正负交替现象.

### 3.2 稳定性分析(Stability analysis)

对于离散系统, 离散滑模的存在和到达条件为

$$\begin{cases} [s(k+1) - s(k)]\text{sgn}(s(k)) < 0, \\ [s(k+1) + s(k)]\text{sgn}(s(k)) > 0. \end{cases} \quad (20)$$

式(20)对于离散滑模运动的存在是充分必要条件, 能够保证系统的稳定性. 文献[14]中针对幂次函数趋近律进行了稳定性分析, 证明了当 $|s(k)| \geq \delta$ 和 $|s(k)| < \delta$ 时基于幂次函数的离散滑模趋近律满足离散滑动模式的存在性和到达性条件. 因此, 所设计的控制系统是稳定的.

## 4 实验结果及分析(Experiment results and analysis)

本文以某全景式航空相机的镜筒控制系统作为被控对象, 它是由镜筒控制器及外围电路、功率放大电路、镜筒电机、镜筒角度编码器、镜筒陀螺组成, 其结构如图2所示.

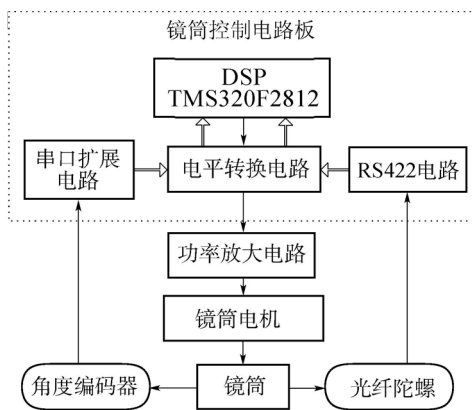


图2 镜筒控制系统结构图

Fig. 2 Structure of drawtube control system

镜筒控制器采用32位数字信号处理器TMS320F2812, 它具有结构简单、控制精度高、实时性强等特点. 镜筒陀螺采用光纤陀螺, 输出为数字信号, 通过TMS320F2812的串口进行数据采集. 镜筒编码器为16位绝对式编码器, 它是通过串口扩展电路与镜筒控制器进行数据传输. 镜筒电机采用直流力矩电机, 它可以在低转速甚至堵转下长期工作. 功率放大电路为经典的H型双极模式PWM驱动电路.

通过设置TMS320F2812的事件管理器产生PWM信号, 经过功率放大电路后驱动镜筒电机从而实现对接筒速度的控制.

### 4.1 镜筒角速度和角加速度观测实验 (Experiment of angular velocity and angular acceleration observed)

降维状态观测器的反馈增益向量 $K = (1.875, 0.954)$ . 采用超前-滞后校正方法作为镜筒速度环校正方法, 镜筒陀螺作为镜筒角速度的测量元件. 当角速度给定信号为 $5(^{\circ})/s$ 时, 镜筒角速度( $V$ )实测曲线和观测曲线如图3-4所示, 镜筒角加速度( $a$ )的观测曲线如图5所示.

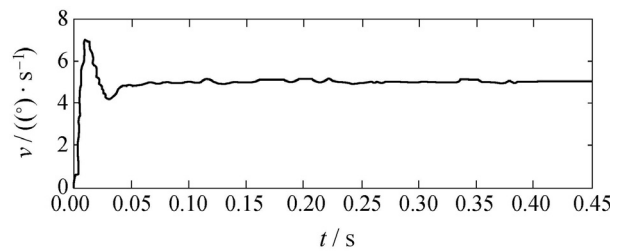


图3 镜筒角速度实测曲线

Fig. 3 Angular velocity curve of drawtube measured by gyro

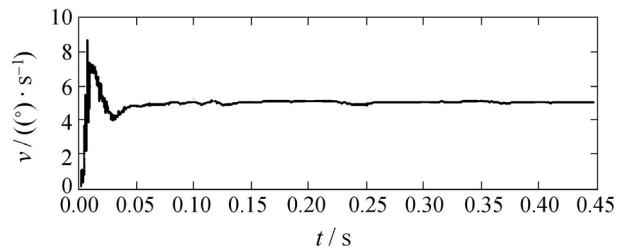


图4 镜筒角速度观测曲线

Fig. 4 Angular velocity curve of drawtube observed by reduced-order state observer

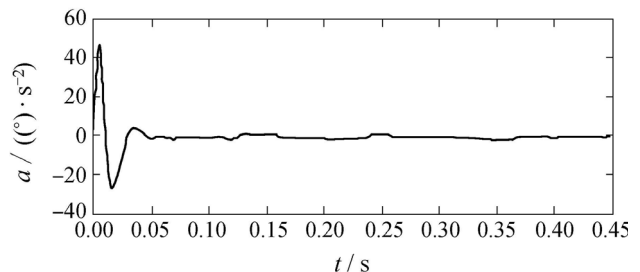


图5 镜筒角加速度观测曲线

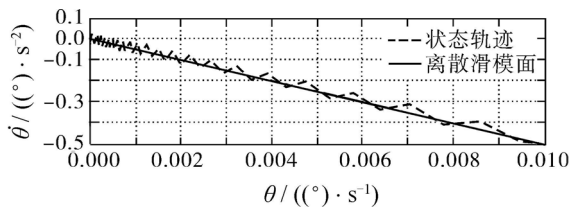
Fig. 5 Angular acceleration curve of drawtube observed by reduced-order state observer

由图3-4可以看出, 在镜筒加速阶段, 由降维状态观测器观测的镜筒速度噪声比较大, 以实测镜筒角速度作为参考值, 观测的镜筒角速度均方根误差为 $0.0387(^{\circ})/s$ . 当镜筒稳速后, 观测的镜筒角速度噪声减小, 均方根误差为 $0.0212(^{\circ})/s$ .

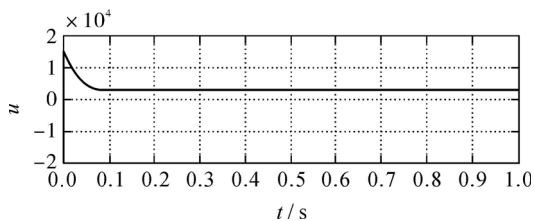
### 4.2 离散趋近律的分析实验(Experiment of discrete-time reaching law analysis)

本文中, 切换函数参数 $C_e = [10 \ 1]$ , 采样周期 $T = 0.001$ ,  $\varepsilon = 5$ ,  $q = 50$ ,  $\alpha = 0.5$ ,  $\delta = 0.01$ . 利用本文设计的基于幂次函数趋近律的离散滑模控制与基于高氏趋近律的离散滑模控制算法作比较, 当镜筒给定角速度为 $6(^{\circ})/s$ 时, 两种离散滑模控制算法的滑模运动相轨迹、控制器输出和降维状态观测器观测的镜筒角速度曲线如图6、图7所示.

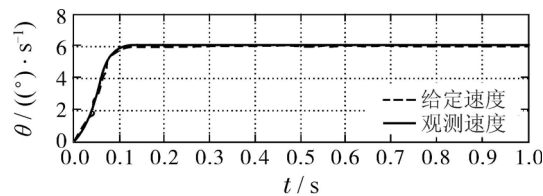
从图6、图7可以看出, 高氏趋近律的离散滑模控制算法在控制镜筒速度系统过程中, 不管是控制器输出、滑模运动相轨迹, 还是镜筒角速度, 最终只能稳定于某个抖振, 不仅影响了系统的稳态精度, 而且还破坏了系统的动态品质. 而采用幂次函数趋近律的离散滑模控制能够有效地消除系统的抖振, 使系统状态无正负交替的快速趋近稳态值. 两种离散滑模控制镜筒速度的参数性能比较见表1.



(a) 相轨迹



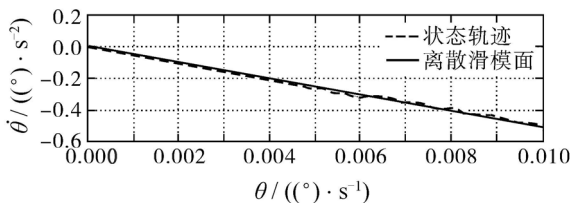
(b) 离散滑模控制器输出



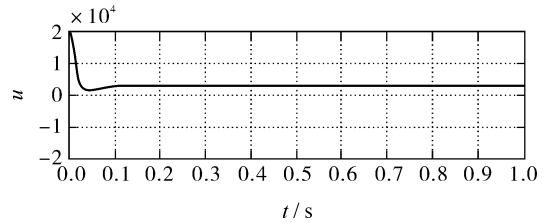
(c) 镜筒角速度观测曲线

图6 基于高氏趋近律的离散滑模控制

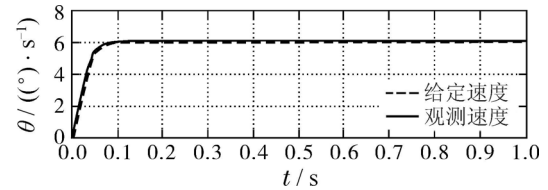
Fig. 6 DSMC with conventional reaching law



(a) 相轨迹



(b) 离散滑模控制器输出



(c) 镜筒角速度观测曲线

图7 基于幂次函数趋近律的离散滑模控制

Fig. 7 DSMC with power-function reaching law

表1 镜筒控制系统参数性能比较

Table 1 Comparison of parameters characteristic of drawtube control system

| 离散滑模控制  | 控制参数   |        |
|---------|--------|--------|
|         | 调节时间/s | 稳态精度/% |
| 高氏趋近律   | 0.16   | 1.6    |
| 幂次函数趋近律 | 0.15   | 0.9    |

### 5 结论(Conclusion)

本文设计一种降维状态观测器, 用于对镜筒角速度、角加速度状态进行观测. 针对高氏趋近律带来的控制抖振和系统抖振问题, 本文采用基于幂次函数趋近律的方法, 并将观测到的镜筒角速度、角加速度信息构成离散滑模控制系统, 应用于某全景式航空相机的镜筒控制系统中. 实验结果表明, 基于幂次函数趋近律的离散滑模控制不仅能够有效地消除系统的抖振, 而且还提高了镜筒控制系统的动态响应特性和稳态精度. 此外, 本文提出的降维状态观测器只需利用镜筒角度编码器反馈的角度信息就能观测到镜筒的角速度、角加速度状态, 使控制方法的应用不依赖于速度、加速度传感器, 具有较高的实用价值.

### 参考文献(References):

- [1] 周刚, 翟林培, 王德江, 等. 全景式航空相机的扫描角研究 [J]. 光学精密工程, 2008, 16(12): 2473 - 2478. (ZHOU Gang, ZHAI Linpei, WANG Dejiang, et al. Research of scanning angle of panoramic aerial camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(12): 2473 - 2478.)
- [2] 吴宏圣, 潘凝, 翟林培. TDI CCD全景式航空相机的像移补偿误差分析 [J]. 光学精密工程, 2003, 11(6): 545 - 549. (WU Hongsheng, PAN Ning, ZHAI Linpei. Image motion compensation error analysis for TDI CCD panoramic aerial camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, 11(6): 545 - 549.)

- [3] 惠守文. 长焦距斜视实时航空相机离焦补偿 [J]. 光学精密工程, 2003, 11(2): 162 – 165.  
(HUI Shouwen. Compensation for long focus oblique real time aerial camera being out of focus [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, 11(2): 162 – 165.)
- [4] 王德江, 匡海鹏, 蔡希昌, 等. TDI CCD全景航空相机前向像移补偿的数字实现方法 [J]. 光学精密工程, 2008, 16(12): 2465 – 2472.  
(WANG Dejiang, KUANG Haipeng, CAI Xichang, et al. Digital implementation of forward motion compensation in TDI CCD panoramic aerial camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(12): 2465 – 2472.)
- [5] 党莹, 李友一, 翟林培, 等. 提高TDI摆扫航空相机镜筒扫描控制系统响应速度的方法 [J]. 武汉大学学报信息科学版, 2003, 28(2): 224 – 226.  
(DANG Ying, LI Youyi, ZHAI Linpei, et al. Approach to improve response speed of drawtube scan velocity control system for TDI side glance aeronautical camera [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2003, 28(2): 224 – 226.)
- [6] 刘岩, 李友一, 陈占军, 等. 模型参考自适应滑模控制方法在前向像移补偿中的应用 [J]. 光学精密工程, 2007, 15(6): 983 – 987.  
(LIU Yan, LI Youyi, CHEN Zhanjun, et al. Application of model reference adaptive sliding mode control to forward compensation system in camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, 15(6): 983 – 987.)
- [7] 刘岩, 李友一, 陈占军, 等. 基于商空间理论的模糊控制在航空相机中的应用 [J]. 南京航空航天大学学报, 2006, 38(7): 88 – 90.  
(LIU Yan, LI Youyi, CHEN Zhanjun, et al. Application of fuzzy controller based on quotient space theory to aerial camera [J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics Astronautics*, 2006, 38(7): 88 – 90.)
- [8] 黄浦, 葛文奇, 李友一, 等. 航空相机前向像移补偿的线性自抗扰控制 [J]. 光学精密工程, 2011, 19(4): 812 – 819.  
(HUANG Pu, GE Wenqi, LI Youyi, et al. Linear auto disturbance rejection control of forward image motion compensation in aerial cameras [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(4): 812 – 819.)
- [9] 肖雁鸿, 周靖林, 葛召炎, 等. 离散时间系统变结构控制基于衰减控制的趋近律 [J]. 控制理论与应用, 2002, 19(3): 450 – 452.  
(XIAO Yanhong, ZHOU Jinglin, GE Zhaoyan, et al. The reaching law for variable structure control of discrete time system based on attenuation control [J]. *Control Theory & Applications*, 2002, 19(3): 450 – 452.)
- [10] 孙彪, 孙秀霞, 陈琳, 等. 基于幂次函数的离散滑模控制算法 [J]. 控制与决策, 2011, 26(2): 285 – 288.  
(SUN Biao, SUN Xiuxia, CHEN Lin, et al. Algorithm of discrete time sliding mode control based on power function [J]. *Control and Decision*, 2011, 26(2): 285 – 288.)
- [11] 王瑞芬, 贾廷纲, 牛玉刚. 一类控制输入饱和和受限的不确定系统滑模控制 [J]. 控制理论与应用, 2011, 28(9): 1154 – 1158.  
(WANG Ruifen, JIA Tinggang, NIU Yugang. Sliding-mode control for uncertain systems with input saturation [J]. *Control Theory & Applications*, 2011, 28(9): 1154 – 1158.)
- [12] 刘金琨, 孙富春. 滑模变结构控制理论及其算法研究与进展 [J]. 控制理论与应用, 2007, 24(3): 407 – 418.  
(LIU Jinkun, SUN Fuchun. Research and development on theory and algorithms of sliding mode control [J]. *Control Theory & Applications*, 2007, 24(3): 407 – 418.)
- [13] 李鹏, 马建军, 郑志强. 采用幂次趋近律的滑模控制稳态误差界 [J]. 控制理论与应用, 2011, 28(5): 620 – 624.  
(LI Peng, MA Jianjun, ZHENG Zhiqiang. Sliding mode control approach based on nonlinear integrator [J]. *Control Theory & Applications*, 2011, 28(5): 620 – 624.)
- [14] 孙彪, 孙秀霞. 一种新的趋近律离散滑模控制方法及仿真 [J]. 系统仿真学报, 2010, 22(10): 2421 – 2425.  
(SUN Biao, SUN Xiuxia. New algorithm of reachinglaw discretetime sliding mode control and simulation [J]. *Journal of System Simulation*, 2010, 22(10): 2421 – 2425.)

#### 作者简介:

**张雪菲** (1982–), 女, 博士研究生, 主要从事航空成像与测量技术及数字控制技术研究, E-mail: dashafei@sohu.com;

**丁亚林** (1964–), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事航空遥感器稳像技术的研究, E-mail: dingy11964@sohu.com;

**李昕阳** (1984–), 男, 博士研究生, 主要从事航空成像与测量技术及数字控制技术研究, E-mail: lixynx@126.com;

**陈志超** (1979–), 男, 博士研究生, 主要从事航空成像自动检焦技术的研究, E-mail: jackcncc@live.cn.