文章编号 1004-924X(2007)06-0983-05

模型参考自适应滑模控制方法在前向像移补偿中的应用

刘 岩[1,2],李友一[1],陈占军[1,2],葛文奇[1]
(1.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 100049)

摘要:为了提高航空相机的飞行分辨率,提出了一种基于模型参考自适应的滑模控制方法。用模型参考自适应算法对时变系统参数进行在线辨识,并改变滑模控制器的控制参数。采用基于衰减控制的变速趋近律作切换函数,加快系统收敛速度,减小切换过程中的抖动。实验结果表明,同 PID 控制方法相比较,模型参考自适应滑模控制方法将速度补偿误差降低了 60%,相应地将航空相机的飞行分辨率提高了 2 倍。因此,基于此方法的前向像移补偿系统可提高速度跟踪精度和鲁棒性,对时变干扰力矩具有较强的抑制能力。

关 键 词:自适应控制;滑模控制;像移补偿;衰减控制趋近律;不确定时变干扰
中图分类号:TP273.2;V447.3 **文献标识码**:A

Application of model reference adaptive sliding mode control to forward compensation system in camera

LIU Yan[1,2], LI You-yi[1], CHEN Zhan-jun[1,2], GE Wen-qi[1]

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*;
2. *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)

Abstract: In order to improve the flight resolution of a aerial camera, a new Model Reference Adaptive Sliding Mode Control (MRAC-SMC) solution is presented. The model reference adaptive algorithm is used to identify time-variant system parameters and modify switching function of sliding mode controller, and the variable rate reaching law based on attenuation control is taken as the switching function of SMC to quicken the convergence in system and reduce the chattering caused by switching. The experiment results indicate that the velocity compensation error can be reduced by 60% and accordingly flight resolution can be increased by 200% by MRAC-SMC compared with PID control. Therefore, forward image motion compensation system based on MRAC-SMC can improve velocity tracking accuracy and robust performance and can overcome the effect of uncertain time-varying forces also.

Key words: adaptive control; sliding mode control; image shift compensation; variable rate reaching law; uncertain time-varying disturb

收稿日期:2007-03-29;**修订日期**:2007-05-15.
基金项目:国防预研项目

1 引　言

前向补偿伺服系统的伺服精度会直接影响相机的飞行分辨率，造成前向伺服系统伺服精度下降的主要因素一是摩擦力矩、耦合力矩等外部干扰力矩，二是由于传动系统的扰动力矩导致系统参数的变化。

目前前向补偿伺服系统多采用 PID 控制和自适应控制等方法，当伺服系统参数发生小范围变化时，虽然上述方法能保持系统稳定，但却不能满足前向补偿系统的高精度要求，不能进一步提高相机的飞行分辨率。对于含参数不确定性的对象，采用自适应控制方法，通过在线估计未知参数，且同时修改控制策略，可以提高实际闭环系统的性能指标。但在对自适应算法鲁棒性问题的研究中，Rohrs[1] 通过理论分析和仿真试验表明，由于不确定的外部干扰因素及无法线性化参数的非线性摩擦等因素的影响，往往都可能导致系统不稳定。针对高精度伺服系统中存在的这一问题，考虑采取滑模控制与自适应控制方法相结合的控制方法，此方法是解决参数不确定或时变参数系统控制问题的一种新型策略。R. H. Sira 等人[2] 首先针对线性化系统将自适应 Backstepping 与滑模变结构设计方法结合在一起，实现了自适应滑模变结构控制。此后，M. R. Bolivar 等人[3] 针对一类最小相位的可线性化的非线性系统，设计了一种动态自适应变结构控制器，实现了带有不确定性和未知外干扰的非线性系统的鲁棒控制。最近 Haijun. Gu 等人[4] 提出了一种新的多输入多输出的模型参考自适应滑模控制器设计方法，实现了对参数时变的高阶非线性系统的鲁棒控制。模型参考自适应滑模控制方法在混沌系统中成为很多学者的研究热点[5-7]。

本文将模型参考自适应滑模控制方法(MRAC-SMC)应用于相机前向补偿伺服系统中，通过理论推导和实验分析证明其稳定性并能有效地提高相机的飞行分辨率。

2 模型参考自适应滑模控制

前向补偿伺服机械由直流力矩电机直接驱动反射镜，由于相机处于惯性空间，因此采用速率陀螺作为速率反馈元件，由于光路原因陀螺通过钢带传动由电机驱动。假设反射镜框架质量分布均匀，重力矩忽略不计，前向补偿伺服系统可以用如下微分方程描述[8]：

$$J\ddot{\theta}+B\dot{\theta}=u+d\ , \tag{1}$$

其中：J 为等效转动惯量，B 为等效阻尼系数，u 为控制电压，d 为等效干扰，θ 为反射镜转角。

取前向补偿伺服系统速度环的参考模型：

$$J_n\ddot{\theta}_n+B_n\dot{\theta}_n=\mu\ , \tag{2}$$

$$\mu=\gamma-\dot{\theta}\ , \tag{3}$$

式中，J_n 为参考模型的等效转动惯量，B_n 为参考模型的等效阻尼系数，μ 为模型输入，θ_n 为模型输出。令 $e=\theta-\theta_n$，由式(1)、(2)、(3)可得基于模型参考自适应控制的电机误差微分方程：

$$\ddot{e}=-\left(\frac{B}{J}-\frac{1}{J_n}\right)\dot{\theta}+\frac{u}{J}+\frac{d}{J}+\frac{B_n}{J_n}\dot{\theta}_n-\frac{\gamma}{J_n}\ , \tag{4}$$

取 $x_1=e$，令 $\omega=\dot{\theta}$，$\omega_n=\dot{\theta}_n$ 则速度误差状态方程为

$$\begin{cases}\dot{x}_1=x_2\\ \dot{x}_2=a\omega+D+\dfrac{B_n}{J_n}\omega_n-\dfrac{\gamma}{J_n}+bu\end{cases}\ , \tag{5}$$

式中 $a=-\left(\dfrac{B}{J}-\dfrac{1}{J_n}\right)$，$b=\dfrac{1}{J}$，$D=\dfrac{d}{J}$

选取切换函数为

$$s(t)=cx_1+x_2\ , \tag{6}$$

式中 c 为滑模切换系数。根据滑模等效控制条件，由式(6)求导可得

$$\dot{s}(t)=c\dot{x}_1+\dot{x}_2=0\ , \tag{7}$$

将式(5)代入式(7)，整理得到满足滑模控制条件的等效控制作用[9]：

$$u_{\mathrm{eq}}=-\frac{1}{b}\left[a\omega+\frac{B_n}{J_n}\omega_n+|D|\,\mathrm{sgn}(\omega)-\frac{\gamma}{J_n}+cx_2\right]\ , \tag{8}$$

令 $h_1=-\dfrac{a}{b}$，$h_2=-\dfrac{|D|}{b}$，$h_3=-\dfrac{1}{b}$，$r_1=\omega$，$r_2=\mathrm{sgn}(\omega)$，$r_3=cx_2+\dfrac{B_n}{J_n}\omega_n-\dfrac{\gamma}{J_n}$，整理后得：

$$u_{\mathrm{eq}}=h_1r_1+h_2r_2+h_3r_3=\sum_{i=1}^{3}h_ir_i\ , \tag{9}$$

由基于衰减控制的变速趋近律得滑模切换控制作用[10]，

$$u_{\mathrm{vs}}=-\frac{1}{b}\left[k_0s+k_1|s|^{\alpha}\mathrm{sgn}(s)\right]\ , \tag{10}$$

所以模型参考自适应滑模控制的速度控制器为：

$$u = u_{eq} + u_{vs} = \sum_{i=1}^{3} h_i r_i - \frac{1}{b}[k_0 s + k_1 \mid s \mid^{\alpha} \mathrm{sgn}(s)], \quad (11)$$

模型参考自适应滑模切换控制的能达性：

由式(5)、(6)、(11)可得：

$$\dot{s}(t) = c\dot{x}_1 + \dot{x}_2 = cx_2 + \dot{x}_2 = -k_0 s - k_1 |s|^{\alpha} \mathrm{sgn}(s) + (a + bh_1) r_1 + (|D| + bh_2) r_2 + (1 + bh_3) r_3 = -k_0 s - k_1 \mid s \mid^{\alpha} \mathrm{sgn}(s) + \sum_{i=1}^{3} H_i r_i, \quad (12)$$

其中 $H_1 = a + bh$，$H_2 = |D| + bh_2$，$H_3 = 1 + bh_3$，则

$$s\dot{s} = -k_0 s^2 - k_1 \mid s \mid^{\alpha+1} + \sum_{i=1}^{3} H_i s r_i, \quad (13)$$

由于 $h_1 = -\frac{a}{b}$，$h_2 = -\frac{|D|}{b}$，$h_3 = -\frac{1}{b}$，则式(13)整理得

$$s\dot{s} = -k_0 s^2 - k_1 |s|^{\alpha+1}, \quad (14)$$

当 $k_0 > 0$，$k_1 > 0$ 时，s 随时间的增长以衰减指数速度趋近于 0，到达 $s(t) = 0$ 切换面，即 $\lim\limits_{t \to \infty} s = 0$。

用 Lyapunov 第二法求得 $h_i (i = 1, 2, 3)$ 的自适应率为

$$h_i = h_{i0} + P_i s r_i + Q_i \int s r_i \mathrm{d}t, \quad (15)$$

式中 $h_{10} = \frac{a}{b}$，$h_{20} = \frac{d}{b}$，$h_{30} = \frac{1}{b}$，$P_i = \frac{\beta_i}{b}$，$Q_i = \frac{\alpha_i}{b}$ $(i = 1, 2, 3)$

其稳定性证明如下：

首先定义 Lyapunov 函数[11]

$$V = s^2 + \sum_{i=1}^{3} \frac{1}{\alpha_i} (H_i + \beta_i s r_i)^2 > 0, \quad (16)$$

式中 $\alpha_i > 0$，$\beta_i > 0$

对式(16)求导得

$$\dot{V} = 2s\dot{s} + 2\sum_{i=1}^{3} \frac{1}{\alpha_i} (H_i + \beta_i s r_i)[\dot{H}_i + \beta_i \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(s r_i)], \quad (17)$$

对 $H_1 = a + bh_1$，$H_2 = |D| + bh_2$，$H_3 = 1 + bh_3$ 求导，得

$$\dot{H}_i = -b\dot{h}_i, \quad (18)$$

将式(15)求导代入式(18)得

$$\dot{H}_i = -\beta_i \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(s r_i) - \alpha_i s r_i, \quad (19)$$

将式(19)代入式(17)中得

$$\dot{V} = -2k_0 s^2 - 2k_1 \mid s \mid^{\alpha+1} - 2\sum_{i=1}^{3} \beta_i (s r_i)^2, \quad (20)$$

因为 $k_0 > 0$，$k_1 > 0$，因此式(20)有

$$\dot{V} = -2k_0 s^2 - 2k_1 \mid s \mid^{\alpha+1} - 2\sum_{i=1}^{3} \beta_i (s r_i)^2 < 0, \quad (21)$$

由式(16)和式(21)可知 Lyapunov 函数 $V > 0$，而其导数 $\dot{V} < 0$，所以系统是渐近稳定的。

3　实验与仿真分析

相机拍照时，由于飞机飞行，则在像面产生前向像移[12]。飞机前向像移角速度表达式[13]为：

$$\omega_{IMC} = \frac{V}{H} \sin\theta \cos Y \cos P, \quad (22)$$

其中：V 为飞机飞行速度，H 为飞机飞行高度，θ 为相机的扫描角，Y 为飞机偏流角(真航迹和真航向的夹角)，P 为飞机俯仰角。由于光路反射，因此补偿前向像移反射镜的转动角速度为飞机前向像移角速度的一半。这样，在前向像移补偿系统中通过钢带带动陀螺。前向像移补偿系统结构框图如图 1 所示。图中 G_{FMC} 为前向补偿控制器，n 为反射镜与陀螺间的钢带速比，即 $n = 2:1$，ω_Y 和 ω_P 分别为飞机在偏流方向和俯仰方向的姿态角度变换速度。

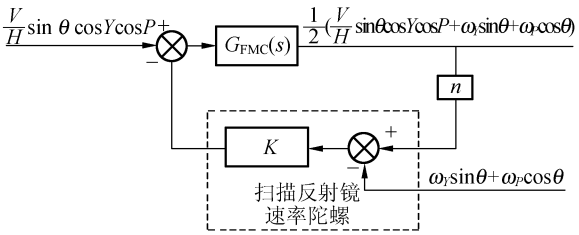


图 1　反射镜伺服系统的像移补偿原理图

Fig. 1　Block diagram of forward image motion compensation in reflecting mirror servo system

MRAC-SMC 控制方法以相机前向像移补偿系统反射镜为控制对象，进行实验分析。实验中相机以 28.4(°)/s 恒速摆扫，假定飞机速高比为最小速高比 0.01 rad/s 且飞机的偏航角 Y 和俯仰角 P 均为零。通过频域系统辨识方法得到广义对象的模型参数为 $J_n = 0.0072$ V/(°)·s^{-2}，$B_n = 0.11$ V/(°)·s^{-1}，通过力学实验得到系统等

效转动惯量 J，等效阻尼系数 B 变化范围：

$0.002\ \mathrm{V/(°)\cdot s^{-2}}<J<0.012\ \mathrm{V/(°)\cdot s^{-2}}$，

$0.06\ \mathrm{V/(°)\cdot s^{-2}}<B<0.11\ \mathrm{V/(°)\cdot s^{-1}}$，

取初始控制参数 $J=J_n$，$B=B_n$，SMC 控制器参数 $c=20$，$k_0=0.6$，$k_1=20$，则角速度指令信号 $r=0.2865\sin 0.4956t(°)$。设计参考模型自适应滑模控制的前向像移补偿系统，结构原理图如图 2 所示。

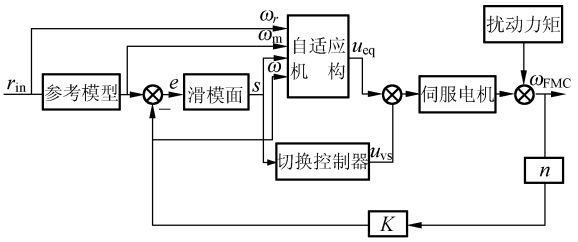
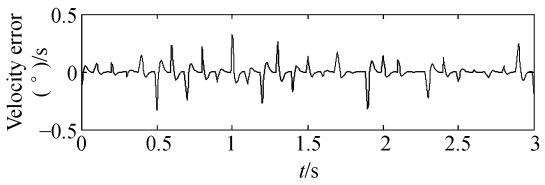


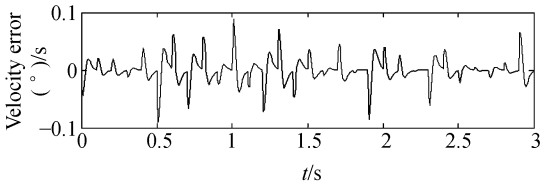
图 2　基于 MRAC-SMC 的系统控制原理图

Fig. 2　Block diagram of MRAC-SMC control system

实验中分别采用 MRAC-SMC 控制方法和原有的 PID 控制方法进行实验。由于陀螺产生的噪声混叠于实验数据中，经过滤波后得到误差曲线如图 3 所示，其中图(a)为原有 PID 控制算法的控制误差曲线，图(b)为基于 MRAC-SMC 控制算法的控制误差曲线。



(a)PID



(b)MPAC-SMC

图 3　系统误差曲线图

Fig. 3　Chart of system error

相机采用 96 级 TDI CCD 作为成像原件，其曝光时间为 1/1000 s，相机焦距为 450 mm。对实验结果分析比较如表 1 所示。

表 1　前向像移补偿系统速度误差及性能比较

Tab. 1　Comparison of forward image motion compensation with different controllers

控制方法	速度误差 (m·rad/s)	剩余像移量 (μm)	飞行分辨率 (lp/mm)
PID	1.4419	62.3	16
MRAC-SMC	0.5024	21.7	46

对比上述两种控制方法的控制效果，在前向像移补偿系统中应用 MRAC-SMC 控制方法可以将速度误差降低 65.1%，这样理论上可以将飞行分辨率提高 2.875 倍[14]。因此，MRAC-SMC 控制方法对外部干扰力矩有较强的鲁棒性，且在不确定参数变化的情况下，仍能保持稳定和速度跟踪精度同时改善动态性能。

4　结　论

本文针对相机前向补偿系统低速下受外部力矩扰动导致飞行分辨率下降的问题，提出了一种模型参考自适应滑模控制方法，使用速度闭环跟踪参考模型。其主要优点是抑制诸如摩擦力矩等可建模非线性力矩的干扰，自适应系统参数变化，改善动态性能，提高速度补偿精度。通过实验证明采用 MRAC-SMC 方法可以有效地降低补偿速度误差，提高相应的飞行分辨率。

参考文献：

[1] ROHRS, CHARLES E. How the paper 'Robustness of model-reference adaptive control systems with unmodelled dynamics' misrepresents the results of rohrs and his coworkers[J]. *International Journal of Control*, 1985, 41(2): 575-580.

[2] SIRA R H, LLANES S O. Adaptive dynamical sliding mode control via backstepping[C]. *Proceeding of the 32nd IEEE Conference on Decision and Control*, 1993, 2: 1422-1427.

[3] BOLIVAR M R, ZINOBER A S I, SIRA-RAMIREZ H. Dynamic adaptive sliding mode output tracking control of a class of nonlinear systems[J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 1997, 7(4): 387-405.

[4] YAN J J, HUNG M L, LIAO T L. Adaptive sliding mode control for synchronization of chaotic gyros with fully unknown parameters[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2006, 298: 298-306.

[5] YAU H T. Design of adaptive sliding mode controller for chaos synchronization with uncertainties[J]. *Chaos, Solutions and Fractals*, 2004, 22: 341-347.

[6] CHEN X K. Adaptive sliding mode control for discrete-time multi-input multi-output systems[J]. *Automatica*, 2006, 42: 427-435.

[7] YAN J J, SHYU K K, LIN J SH. Adaptive variable structure control for uncertain chaotic systems containing dead-zone nonlinearity[J]. *Chaos, Solutions and Fractals*, 2005, 25: 347-355.

[8] 刘强,冯姝婷,尔联洁. 高精度机械伺服系统的一种新型自适应滑模控制方法[J]. 控制理论与应用, 2004, 21(2): 239-241.
LIU Q, FENG SH T, ER L J. Novel adaptive sliding mode control scheme of high precision mechanical servo system[J]. *Control Theory & Application*, 2004, 21(2): 239-241. (in Chinese)

[9] ROPI, SHMW, JEONG S. Robust friction compensation for sub-micrometer positioning and tracking for a ball-screw-driven slide system [J]. *Precision Engineering*, 2000, 24: 160-173.

[10] XIAO Y H, ZHOU J G. The reaching law for variable structure control of discrete time system based on attenuating control [J]. *Control Theory and Applications*, 2002, 19(3): 450-452.

[11] 韩曾晋. 自适应控制[M]. 北京:清华大学出版社, 1999.
HAN Z J. *Adaptive Control*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1999. (in Chinese)

[12] 刘明,吴宏圣,匡海鹏,等. 航空相机的像移补偿方法及应用[J]. 光学 精密工程, 2004, 12(4): 30-34.
LIU M, WU H SH, KUANG H P, *et al*.. Method and application of image motion compensation in aerospace camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(4): 30-34. (in Chinese)

[13] 翟林培,刘明,修吉宏. 考虑飞机姿态角时倾斜航空相机像移速度计算[J]. 光学 精密工程, 2006, 14(3): 490-494.
ZHAI L P, LIU M, XIU J H. Calculation of image motion velocity considering airplane gesture angle in oblique aerial camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(3): 490-494. (in Chinese)

[14] 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): 345-348.
WU H SH, PAN N, ZHAI L P. Image motion compensation error analysis for TDI CCD panoramic aerial camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(6): 345-348. (in Chinese)

作者简介:刘　岩(1978—),男,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士研究生,主要从事机载光电设备伺服控制技术研究。E-mail: bluedrops-78@163.com