

快速反射镜在像移补偿中的应用

王正玺^{1,2}, 张 葆^{1*}, 李贤涛¹, 张士涛^{1,2}

(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. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 本文提出了一种基于快速反射镜的像移补偿方法用于解决航空成像中的像移问题。首先通过计算航空相机在曝光时间内的像移速度证明了像移补偿的必要性; 针对快速反射镜存在伺服模型不确定性的问题, 设计了模型参考自适应控制器; 最后通过实验验证了该算法的性能, 结果显示: 采用本算法后, 快速反射镜的阶跃响应稳定时间降低了 50% 以上, 在振动情况下快速反射镜的稳定精度都可以达到 10 μrad , 精度比传统控制方案提升 10 倍以上。最终的像移补偿成像实验成功验证了基于快速反射镜的像移补偿方案有较高的工程应用价值。

关 键 词: 快速反射镜; 像移补偿; 像移速度; 模型参考自适应控制

中图分类号: TP273 文献标识码: A doi: 10.3788/CO.20201301.0095

Application of fast steering mirror in image motion compensation

WANG Zheng-xi^{1,2}, ZHANG Bao^{1*}, LI Xian-tao¹, ZHANG Shi-tao^{1,2}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail: clearsky_zh@163.com

Abstract: A method of image motion compensation based on Fast Steering Mirrors (FSM) is proposed to solve the problem of image motion in aeronautical imaging. Firstly, the necessity of image motion compensation is proven by calculating the image motion velocity of the aeronautical camera in exposure time. Then, a model reference adaptive controller is designed to solve uncertainties in the servo model of an FSM. The experimental results indicate that the stable time of step response is reduced by more than 50% comparing with traditional methods. The stability accuracy of the FSM can reach 10 μrad even under vibration condition, which means the accuracy of this method is 10 times better than that of traditional methods. A final image motion compensation imaging experiment proves that our image motion compensation scheme based on an FSM has high value in engineering applications.

Key words: Fast Steering Mirrors(FSM); image motion compensation; image motion velocity; model reference adaptive controller

收稿日期: 2019-03-19; 修订日期: 2019-05-14

基金项目: 国家自然科学基金(No. 1705225)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 1705225)

1 引 言

装有光电侦察平台的载机通常具有高机动性,而且平台在工作过程中易受外来扰动力矩的影响,使得设备在航拍过程中将产生像移^[1]。像移的存在严重限制了航空相机性能的发挥,使拍摄的图像模糊,甚至无法使用。因此有必要对像移进行补偿,从而提高成像质量^[2]。

对侦察设备像移进行补偿的本质就是要在相机的曝光时间内使目标所成的像和成像介质之间保持相对静止。依据引起像移的因素可以将像移分为以下几类:侦察机前向飞行引起的前向像移、侦察机飞行姿态变化带来的随机像移、在广域扫描成像过程中产生的扫描像移以及其他载荷的机械振动引起的振动像移。对于振动像移,一般通过加入减震器来降低其对相机成像的影响,而其它几类像移必须采用相应手段进行主动式补偿,比较常用的补偿方案主要有以下几种^[1,3,4]:

(1) 移动光学元件

该方式采用光学方法通过移动或旋转光路中部分光学元件(如楔形镜或反射镜),使最终照射到成像介质上的光线按照一定的方式改变方向,从而保证在曝光时间内焦平面与跟踪对象保持相对静止,最终达到像移补偿的目的。由于原理简单易于实现,该方案在上世纪 80 年代初就已经被美国应用到了其 KA-412A 和 KS-446 航空相机上。

(2) 移动感光介质

该方案又可称为机械像移补偿,其基本原理是首先通过获取系统的各种运动参数解算出相机的像移速度,并通过控制焦平面的一个同步运动使目标所成影像在胶片上的像移量为零。该补偿方案适用于载机姿态变化以及平台扫描运动引起的像移,另有相关专家提出可以通过结合图像相关信息来对像移进行二维补偿,但该补偿方案也存在相应缺陷,即不能对快速大视场的像移进行补偿。

(3) 电子式像移补偿

该方式主要是通过电荷转移方式在曝光时

间内控制相机感光面上的电荷转移速度,使其等于目标成像的移动速度,从而达到像移补偿的目的^[5]。该补偿方案在美国多种型号侦察相机上得到了应用,如 CA-260、CA-270、CA-290 等。但是在实际应用过程中为了达到广域成像的目的,通常需要采用大面阵探测器,使得电荷读出时间比较长,帧频低,在一定程度上限制了其应用。

(4) 图像式像移补偿

图像式像移补偿又被称为软件补偿方法,其通过建立像移引起的图像退化数学模型,对存在像移的图像进行图像恢复。由于芯片的计算能力有限,使得该补偿方案的实时性不是很好,尤其是在广域扫描侦察模式下,需要处理的数据量较高,应用比较受限。

随着机载侦察系统向远距、长焦、高分辨率方向的发展,以及新型侦察机的飞行速度不断提高,像移补偿已成为航空成像领域的一项必要技术。当前主流的像移补偿技术已不再满足新型航空相机的像移补偿要求,国内外不少研究机构开始研究基于快速反射镜(Fast Steering Mirror, FSM)的新型高精度像移补偿技术^[6-7]。国外一些新型侦察设备如“全球鹰”已经配备快速反射镜进行航空侦察的像移补偿和二级稳定控制^[8]。除了航空相机,加州州立大学为其设计的空间光学系统同样加入了快速反射镜来消除其扫描像移。我国仅在一些航天成像系统中对像移补偿有所研究应用^[9-40],在航空成像领域的研究才刚刚起步提升。当前我国主流的侦察平台仍然采用两轴两框架或两轴四框架这种传统框架稳定的结构,很少采用像移补偿策略,或是采用传统的像移补偿手段,但其精度低效果差。

传统像移补偿需要针对不同像移成因进行多次计算,最终合成一个像移补偿量,计算复杂。本文针对传统航空像移补偿方案的缺陷,采用快速反射镜对航空像移进行补偿。本文提出通过矢量变换解算出快速反射镜的像移补偿角度,设计了模型参考自适应(Model Reference Adaptive Control, MRAC)控制器增强了控制系统的稳定精度和鲁棒性,并通过实验验证了像移补偿效果。

2 像移补偿的必要性及补偿角度解算

2.1 像移补偿必要性分析

为了提高广域成像的帧频,机载侦察平台通常会选择扫描成像模式,但扫描运动会带来高频扫描像移。要拍摄高信噪比的图像,通常所需的曝光时间就比较长,假设像移速度一定,则像移量就会增加。尤其是在长焦情况下,图像质量会明显下降,因此像移是一个不可忽略的问题。

除了扫描像移,飞机在飞行成像过程中还会存在向前飞行的前向像移,以及飞机的偏航、俯仰、横滚运动带来的运动像移。机载侦察平台的扫描运动是通过框架的方位运动来实现的,同理,平台的俯仰运动在拍照时同样会带来相应的像移。要在远距长焦情况下获取高分辨的扫描图像就必须解决像移问题。

机载侦察平台像移的产生主要有两个原因:飞机自身运动和平台扫描成像时的扫描运动。飞机飞行运动带来的像移可以通过解算相应的像移角速度并进行相应的补偿来消除。

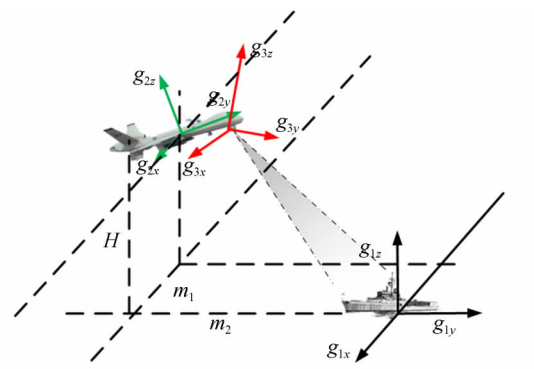


图1 航空成像系统几何关系图

Fig.1 Geometry diagram of aeronautical imaging system

2.2 快速反射镜像移补偿角速度解算

侦察平台在对地面目标进行成像时涉及的坐标系包括:地面坐标系 $G_1(g_{1x}, g_{1y}, g_{1z})$ 、载机坐标系 $G_2(g_{2x}, g_{2y}, g_{2z})$ 、像面坐标系 $G_3(g_{3x}, g_{3y}, g_{3z})$ 以及视轴坐标系 $G_4(g_{4x}, g_{4y}, g_{4z})$ 。各坐标系矢量关系图如图1所示。飞机飞行速度 V_{G1} 是由飞机惯导系统给出的,是相对于大地坐标系的矢量,首先将其转换为载机坐标系下的矢量 V_{G2} ,如式(1)所示:

$$V_{G2} = \begin{bmatrix} v_{2x} \\ v_{2y} \\ v_{2z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(r) & 0 & -\sin(r) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(r) & 0 & \cos(r) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(q) & \sin(q) \\ 0 & -\sin(q) & \cos(q) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(w) & \sin(w) & 0 \\ -\sin(w) & \cos(w) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} v_{1x} \\ v_{1y} \\ v_{1z} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

将速度矢量 V_{G2} 转换到惯导测量系统坐标系下,用 V_{G4} 表示,即视轴坐标系下的表示:

$$V_{G4} = \begin{bmatrix} v_{4x} \\ v_{4y} \\ v_{4z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\beta) & 0 & -\sin(\beta) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\beta) & 0 & \cos(\beta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(a) & -\sin(a) & 0 \\ \sin(a) & \cos(a) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{2x} \\ v_{2y} \\ v_{2z} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} A_{ex} \\ A_{ey} \\ A_{ez} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(w) & \sin(w) & 0 \\ -\sin(w) & \cos(w) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(q) & \sin(q) \\ 0 & -\sin(q) & \cos(q) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(r) & 0 & -\sin(r) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(r) & 0 & \cos(r) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{ex} \\ A_{ey} \\ A_{ez} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

通过该视轴单位向量以及载机飞行高度 H 可以计算机载平台与地面目标的距离:

平台框架的状态,即视轴指向,是通过编码器给出的偏航角 α 和俯仰角 β 表示的,需要转为相应的矢量表示 A_e :

$$\begin{bmatrix} A_{ex} \\ A_{ey} \\ A_{ez} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\alpha) \cos(\beta) \\ \cos(\alpha) \sin(\beta) \\ \sin(\beta) \end{bmatrix} \quad (3)$$

视轴单位向量 A_e 在大地坐标系下的表示:

$$D = -1 \times (H / \sin(A_{ey})). \quad (5)$$

针对飞机飞行速度带来的像移量,FSM 在偏

航和俯仰两个维度需要补偿的速度量分别为:

$$\begin{aligned} v_{cx} &= \frac{v_{4x}}{2 \times D} \\ v_{cy} &= \frac{v_{4y}}{2 \times D} \end{aligned} \quad (6)$$

式中系数 1/2 是由于快速反射镜的转动角速度与引起的视轴转速比为 2:1。上述针对航空成像特点提出的像移补偿方案采用向量空间指标变换的方法进行求解,高效简便,不需像传统方案那样将不同因素引起的像移单独计算再合并为总像移补偿量。

根据本课题平台性能指标计算出像移参数。设相机焦距为 1500 mm,扫描速度为 5°/s,曝光时间为 1 ms,忽略飞机飞行速度的影响,则此时曝光时间内的像移量约为 131 μm,如果考虑飞机飞行的情况,则像移量更为复杂,而本系统像元尺寸仅为 7.5 μm,因此像移会降低图像的分辨率。有必要采取有效措施进行像移补偿。

3 快速反射镜控制策略

我国市面上可以买到的一些快速反射镜虽然有些带宽可以做到几百甚至上千赫兹,但是大部分的摆角范围、机械尺寸或重量等无法完全满足项目需求。在现有硬件条件下,对本部门自行研制的快速反射镜的控制算法进行了深入研究。被控对象模型参数的不确定性是本课题面临的一个重要问题。当前许多高精度的现代控制算法实现都依赖于对被控对象的高精度建模,如 LGQ 控制和 H_∞ 控制^[11-12],而实际应用情况中,实际被控对象和建立的数学模型之间往往存在着一定差异。为解决此类问题,许多学者对鲁棒控制进行了广泛的研究,并取得了明显的效果,如鲁棒自适应控制,但很多鲁棒算法为了在系统模型参数有所变化的情况下保证系统的稳定性而以牺牲了伺服精度。还有学者有针对性地提出了模型预测算法^[13],对数学模型进行在线修正,但由于算法比较复杂无法保证快速反射镜系统的实时性要求。对此本节结合快速反射镜的特点,首先解决系统的机械谐振问题,然后针对快速反射镜系统

模型参数不确定对现代控制算法应用的限制提出了相应的 MRAC 控制方案。

3.1 MRAC 控制原理

MRAC 控制系统一个主要特点就是“参考模型的提出”^[14]。在 MRAC 控制系统中,参考模型是控制系统的一个主要部分,该模型是依据被控系统的指标要求选取的。它可以理解为对被控对象的一个期望模型,该模型在参考输入指令下的响应应该满足相应指标要求,如超调量、上升时间、阻尼、带宽等^[15]。在控制系统工作过程中,被控对象和参考模型对参考输入的响应存在偏差,MRAC 控制器根据该偏差对相应的前馈或反馈控制器进行调节,目的是使上述响应误差尽量趋于零,这样即使具有未知不确定性的被控对象的输出也可以达到参考模型的性能指标。图 2 是该控制系统的典型结构图,其自适应机构可根据参考模型和被控对象之间的广义误差直接修改控制器参数。

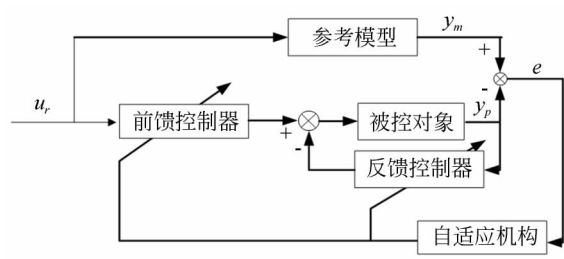


图 2 MRAC 控制系统结构框图

Fig. 2 Block diagram of MRAC

3.2 控制率设计

MRAC 控制方法的核心思想是使被控对象的输出跟踪参考模型,从而提高被控对象的动态性能^[16-18]。基于状态变量的 MRAC 系统结构图如图 3 所示,被控对象的状态方程和参考模型状态方程分别描述为式(7)和式(8):

$$\dot{\mathbf{x}}_p = \mathbf{A}_p \mathbf{x}_p + \mathbf{B}_p \mathbf{u}, \quad (7)$$

$$\dot{\mathbf{x}}_m = \mathbf{A}_m \mathbf{x}_m + \mathbf{B}_m \mathbf{u}, \quad (8)$$

其中 $\mathbf{A}_p, \mathbf{A}_m$ 是 $n \times n$ 矩阵, $\mathbf{u}$ 是被控系统的输入量, $\mathbf{B}_m, \mathbf{B}_p$ 是 $n \times m$ 矩阵, $\mathbf{x}_p, \mathbf{x}_m$ 分别为 n 维系统和参考模型状态向量。

为了使被控对象在参考输入 $\mathbf{y}_r$ 下跟踪参考模

型的输出,在控制系统中设计了相应的前馈和反馈控制器 K 、 F 。由图3可知,FSM控制系统的控制率可以表示为:

$$u = -Fx_p + Ky_r, \quad (9)$$

式中, F 和 K 分别为 $m \times n$ 、 $m \times m$ 维参数时变增益矩阵。

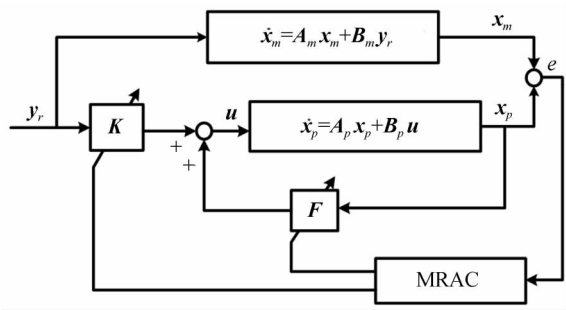


图3 用状态方程描述的 MRAC 系统框图

Fig.3 MRAC system block diagram described by equation of state

将式(9)代入式(7)得:

$$\dot{x}_p = (A_p - B_p F)x_p + B_p Ky_r. \quad (10)$$

则控制系统的最终任务可以认为是求解 K 和 F 的自适应律以达到系统的状态收敛式(11)以及参数收敛式(12)。

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0, \quad (11)$$

$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow \infty} [A_p(t) - B_p(t)F(e, t)] = A_m \\ \lim_{t \rightarrow \infty} [B_p(t)K(e, t)] = B_m \end{cases}. \quad (12)$$

设被控系统和参考模型达到参数收敛时 $F(e, t) = F_0$, $K(e, t) = K_0$, 即:

$$\begin{cases} A_p + B_p F_0 = A_m \\ B_p K_0 = B_m \end{cases}. \quad (13)$$

当系统 A_p 未知,但 B_p 已知或容易辨识时系统状态误差的微分方程可以表示为:

$$\dot{e} = \dot{x}_m - \dot{x}_p = A_m e + (A_m - A_p + B_p F)x_p + (B_m - B_p K)y_r, \quad (14)$$

将式(13)代入式(14)可得:

$$\begin{aligned} \dot{e} &= A_m e + (A_p - B_p F_0 - A_p + B_p F)x_p + \\ &+ (B_p K_0 - B_p K)y_r = A_m e - B_p(F_0 - F)x_p + \\ &+ B_p(K_0 - K)y_r = A_m e - B_p \tilde{F}x_p + B_p \tilde{K}y_r, \end{aligned} \quad (15)$$

式中:

$$\begin{cases} \tilde{F} = F_0 - F \\ \tilde{K} = K_0 - K \end{cases}. \quad (16)$$

根据所选参考模型可知 A_m 渐进稳定,则存在正定矩阵满足如下 Lyapunov 方程:

$$A_m^T P + P A_m = -Q, Q = Q^T > 0. \quad (17)$$

构造 Lyapunov 函数如下:

$$V = e^T P e + \text{tr}(\tilde{F}^T P_F^{-1} \tilde{F}) + \text{tr}(\tilde{K}^T P_K^{-1} \tilde{K}), \quad (18)$$

式中 P 、 P_F 、 P_K 分别为 $n \times n$ 、 $m \times m$ 、 $m \times m$ 的对称正定矩阵; tr 表示矩阵的迹。

将式(18)对时间求导,得:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \dot{e}^T P e + e^T P \dot{e} + \text{tr}(\dot{\tilde{F}}^T P_F^{-1} \tilde{F} + \tilde{F}^T P_F^{-1} \dot{\tilde{F}}) + \\ &+ \text{tr}(\dot{\tilde{K}}^T P_K^{-1} \tilde{K} + \tilde{K}^T P_K^{-1} \dot{\tilde{K}}) = e^T (A_m^T P + P A_m) e + \\ &+ 2\text{tr}(\dot{\tilde{F}}^T P_F^{-1} \tilde{F} + x_p^T P B_p K_0^{-1} \tilde{F}) + \\ &+ 2\text{tr}(\dot{\tilde{K}}^T P_K^{-1} \tilde{K} + y_r^T P B_p K_0^{-1} \tilde{K}). \end{aligned} \quad (19)$$

将式(15)代入式(19)可得:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= e^T (A_m^T P + P A_m) e - 2e^T P B_p \tilde{F}x_p + 2e^T P B_p \tilde{K}y_r + \\ &+ 2\text{tr}(\dot{\tilde{F}}^T P_F^{-1} \tilde{F}) + 2\text{tr}(\dot{\tilde{K}}^T P_K^{-1} \tilde{K}) = -e^T (Q) e - \\ &+ 2e^T P B_p \tilde{F}x_p + 2e^T P B_p \tilde{K}y_r + 2\text{tr}(\dot{\tilde{F}}^T P_F^{-1} \tilde{F}) + \\ &+ 2\text{tr}(\dot{\tilde{K}}^T P_K^{-1} \tilde{K}). \end{aligned} \quad (20)$$

由于

$$e^T P B_p \tilde{F}x_p = \text{tr}(y_r^T P B_p \tilde{F}), \quad (21)$$

$$e^T P B_p \tilde{K}y_r = \text{tr}(y_r^T P B_p \tilde{K}), \quad (22)$$

可得:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -e^T (Q) e + 2\text{tr}(\dot{\tilde{F}}^T P_F^{-1} \tilde{F} - x_p^T P B_p \tilde{F}) + \\ &+ 2\text{tr}(\dot{\tilde{K}}^T P_K^{-1} \tilde{K} + y_r^T P B_p \tilde{K}). \end{aligned} \quad (23)$$

为了保证 $\dot{V}$ 负定。可以令式(23)后两项为零,即:

$$\dot{\tilde{F}} = P_F B_p^T P e y_r^T, \quad (24)$$

$$\dot{\tilde{K}} = -P_K B_p^T P e y_r^T. \quad (25)$$

结合式(16)可得控制系统控制率为:

$$\dot{\tilde{F}} = -P_F B_p^T P e y_r^T, \quad (26)$$

$$\dot{\tilde{K}} = P_K B_p^T P e y_r^T. \quad (27)$$

参数 P_F 、 P_K 在实际实验中需要进行整定。

4 参考模型选取

4.1 快速反射镜模型分析

快速反射镜系统通常由镜面,致动器,基座和挠性铰链组成如图 4 所示。镜子通过挠性铰链连接到底座。柔性铰链结构具有体积小,结构简单,无机械摩擦以及运动灵敏度高等优点。

FSM 可以由音圈致动器(VCA)或压电致动器(PZT)驱动^[19-22]。由于在相同体积下 VCA 的驱动力矩和扫描角度更大,因此本文中快速反射镜由 VCA 驱动。反馈元件采用具有高精度,高工作频率,强抗干扰能力和高带宽等优点的涡流传感器(ECS)来测量 FSM 的旋转角度。

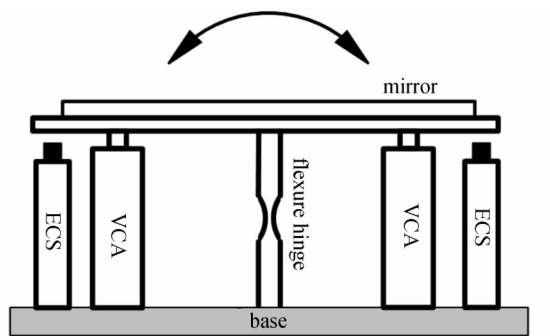


图 4 快速反射镜结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of a FSM

为了分析方便,将快速反射镜视为单输入单输出系统,忽略轴间耦合效应,以简化控制器的设计和分析过程。FSM 驱动的力矩平衡方程可以表示为式(28),其中 J_p 为 FSM 转动惯量, β_p 为 FSM 系统的等效阻尼, K_p 为柔性支撑结构的转矩刚度, k_F 为电机电矩系数, θ 为 FSM 转动角度, u 为控制系统的控制量电压,当 FSM 硬件电路中采用电流环后可以近似认为控制电压和 FSM 受到的驱动力矩成线性关系,即 $F = k_F u$ 。

$$J_p \ddot{\theta} + \beta_p \dot{\theta} + K_p \theta = k_F u. \quad (28)$$

快速反射镜的动力学模型为二阶模型,二阶模型的理想传递函数表达式为式(29)。

$$G_p = \frac{1}{\frac{1}{\omega_n^2} s^2 + \frac{2\xi}{\omega_n} s + 1}. \quad (29)$$

为了便于系统分析和控制器设计,对快速反射镜进行白噪声扫频,用 matlab 拟合的开环频率响应如图 5(彩图见期刊电子版)蓝线所示。

从图 5 可以看出,系统在 240 rad/s 附近的谐振峰严重限制了 FSM 系统的闭环性能。机械谐振的存在甚至可能导致系统不稳定。因此,在设计自适应控制器之前,应首先抑制机械谐振问题。根据 FSM 传递函数的特点,可以通过引入速率反馈来改善系统的阻尼系数,从而消除谐振。这主要是通过 FSM 系统的反馈路径中添加一个导数项来实现的,如图 6 所示。

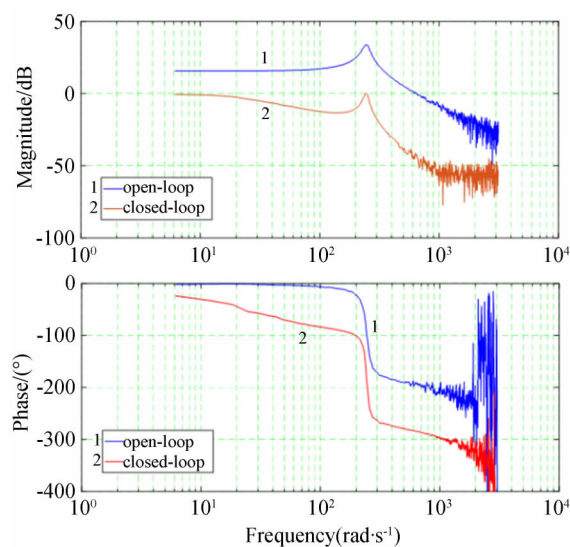


图 5 快速反射镜频率响应

Fig. 5 Frequency responses of the FSM system

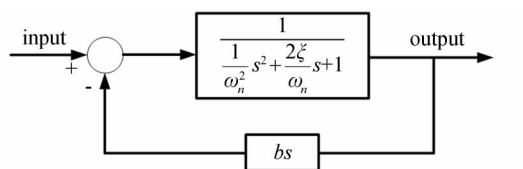


图 6 带速率反馈的二阶系统示意图

Fig. 6 Block diagram of a second order system with rate feedback

引入速率反馈后系统的传递函数变为式(30),对比式(29)可以发现,引入速率反馈使二阶系统的阻尼变大,相当于速率反馈为系统提供了电子阻尼。通过调整速率反馈系数 b ,可以在

一定范围内调节系统阻尼。

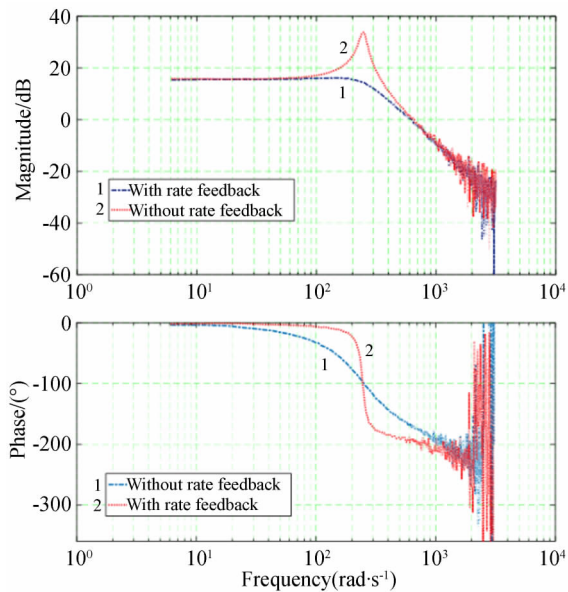


图7 引入速率反馈前后快速反射镜开环频率响应

Fig.7 Open loop frequency responses of the FSM with and without rate feedback

图7(彩图见期刊电子版)显示了引入速率反馈前后的快速反射镜的频率响应。可见引入速率反馈后,通过调节 b 值可以抑制二阶系统的谐振,这将有助于在下一步中设计闭环控制器。

$$G_p = \frac{1}{\frac{1}{\omega_n^2} s^2 + \left(b + \frac{2\xi}{\omega_n}\right)s + 1}. \quad (30)$$

4.2 参考模型选取

为了使MRAC控制满足工程需求,有必要根据性能指标选择一个参考模型,适合的参考模型有利于算法性能的发挥。根据式(29)可知FSM的系统模型近似为一个二阶系统,为了使MRAC控制器更好的发挥性能,本文将参考模型也设置为二阶。式(29)中 ξ 为系统阻尼, ω_n 为系统固有频率,考虑到一个二阶系统在 $0 < \xi < 1$ 时是欠阻尼系统,性能稳定,稳态误差为零,因此参考模型初步确定为欠阻尼二阶模型。

二阶系统的具体参数可以根据一些特征参量确定,如单位阶跃信号下的系统超调量 σ 、上升时间 t_s 等。根据自动控制原理相关知识,系统阶跃响应的上升时间 t_s 满足如下公式:

$$t_s = \frac{-1}{\xi\omega_n} \ln(\Delta \sqrt{1-\xi^2}) = \frac{-1}{\xi\omega_n} (\ln\Delta + \ln\sqrt{1-\xi^2}). \quad (31)$$

根据式(31)绘制 $\omega_n t_s - \xi$ 曲线如图8,由图可知,在 ξ 由零逐渐增大的过程中, $\omega_n t_s$ 先减小后增大,当误差 $\Delta = 5\%$ 时, $\omega_n t_s$ 的最小值出现在 $\xi = 0.78$ 处;当 $\Delta = 2\%$ 时, $\omega_n t_s$ 的最小值出现在 $\xi = 0.69$ 处;出现最小值后, $\omega_n t_s$ 随 ξ 几乎线性增加。因此当 ξ 增大到0.69或0.78时,调整时间 t_s 为最小,在此选取 $\xi = 0.707$ 。此时系统调整时间最小,而且超调也不太大。系统阶跃响应上升时间满足式(32),根据系统对上升时间的要求($t_r < 0.003s$),得 $\omega_n > 1178$,这里为了留有一定裕量,取 $\omega_n = 1250$ 。

$$t_r = \frac{\pi - \varphi}{\omega_d} = \frac{\pi - \arctan \frac{\sqrt{1-\xi^2}}{\xi}}{\omega_n \sqrt{1-\xi^2}} = \frac{\pi - \arccos \xi}{\omega_n \sqrt{1-\xi^2}}. \quad (32)$$

根据以上参数得参考模型的函数形式如式(33):

$$G(s) = \frac{1\,563\,000}{s^2 + 1\,768s + 1\,563\,000}. \quad (33)$$

参考模型带宽可达200 Hz,阶跃上升时间约为2 ms,几乎没有超调,如果FSM输出可以准确地跟踪参考模型的输出,那么FSM实际系统的伺服精度就可以达到所要求的性能指标。

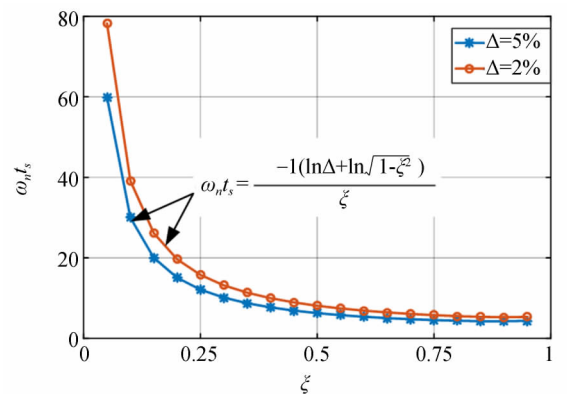


图8 $\omega_n t_s - \xi$ 关系曲线

Fig.8 $\omega_n t_s - \xi$ relationship curves

5 实验验证

为了研究 FSM 系统引入 MRAC 控制器后的效果,进行了多组对比实验。实验装置如图 9 所示。FSM 固定在振动台上,由音圈电机驱动。涡流传感器用于测量镜子的旋转角度以进行闭环操作。数据处理模块完成所有数据处理和分析过程,以及控制算法和控制信号的生成。

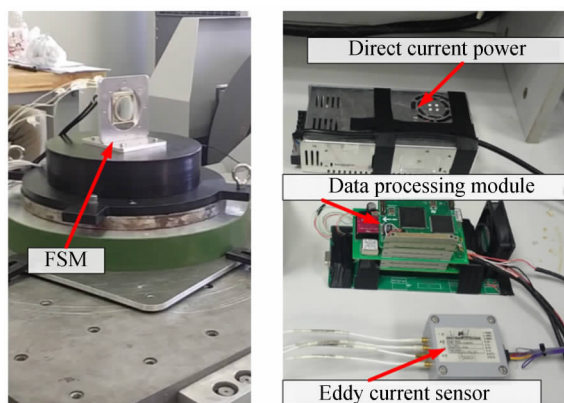


图 9 快速反射镜硬件实验平台

Fig. 9 Hardware experimental platform for FSM

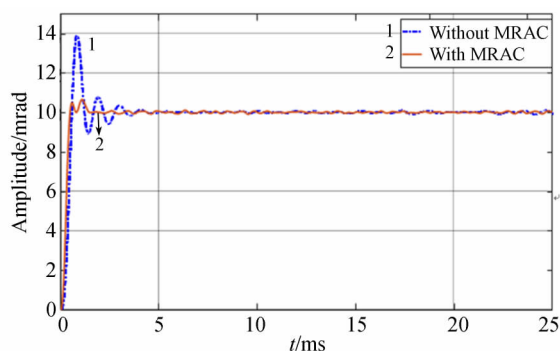


图 10 快速反射镜闭环阶跃响应曲线

Fig. 10 Closed-loop step response curve of FSM

5.1 阶跃响应实验

首先,测试闭环系统的阶跃响应性能。图 10 和 11 分别为系统的阶跃响应曲线和阶跃响应的稳态误差曲线。从图 10(彩图见期刊电子版)可以看出,采用 MRAC 控制算法时系统超调量小于 10%,上升时间小于 3 ms。和传统 PID 控制器的控制效果(蓝线)相比,快速反射镜的性能得到了

极大的提高:阶跃响应的超调量几乎消失,稳定时间减少了 50%。图 11(彩图见期刊电子版)显示阶跃进入稳态后 MRAC 控制器可以使系统的位置稳态误差波动范围更小,稳定精度更高。

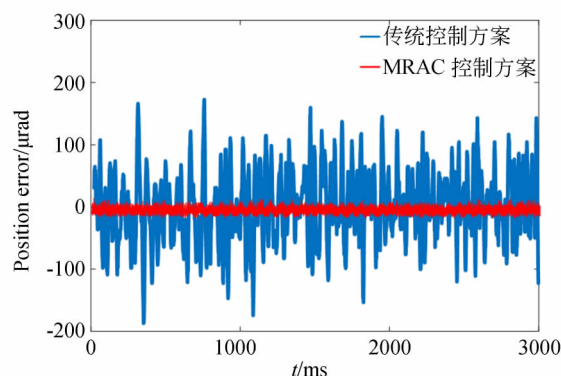


图 11 阶跃响应稳态误差

Fig. 11 Steady state error of step response

5.2 振动实验

快速反射镜实际工作环境非常复杂,存在各种扰动,其中振动是对其性能影响最为严重的一种因素。为了模拟 FSM 实际工作环境以验证算法的鲁棒性,对 FSM 进行了随机振动实验。向振动台施加随机振动,给定加速度为 5 g,考察 FSM 在振动台上的位置跟踪误差,如图 12 所示(彩图见期刊电子版)。经计算传统控制方案在振动条件下的稳定精度只能达到 130 μrad ,而 MRAC 控制器可以表现出良好的性能,稳定精度可达 10 μrad ,精度提升 10 倍以上。

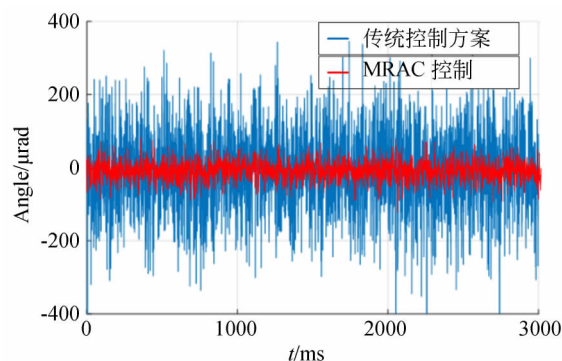


图 12 振动条件下的位置稳定误差

Fig. 12 Position stability error under vibration conditions

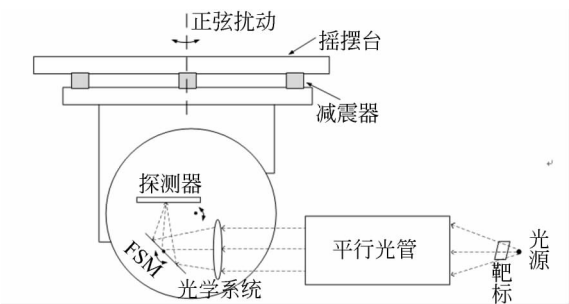


图 13 成像系统原理示意图
Fig. 13 Schematic diagram of imaging system



图 14 平台扫描速度为 5(°)/s 时,几种情况的像移补偿效果对比
Fig. 14 Comparison of image shift compensation effect for three different conditons with platform scanning speed of 5(°)/s

5.3 像移补偿实验

将 FSM 固定到转台上进行像移补偿对比实验,成像系统原理示意图如图 13 所示,外框架进行扫描成像,同时 FSM 进行周期性回扫以补偿扫描像移。表 1 为平台不同转速下,根据分辨率板得到的分辨率数据对比结果。根据光学系统参数计算知,本系统能分辨的最小靶标极限约为

13.33 cycles/mm,证明 FSM 在扫描速度 5°/s 以内可以有效补偿扫描像移,具有较高的工程应用价值。图 14 为平台扫描速度为 5°/s 时的图像对比结果,图中左中右 3 幅图分别对应稳态成像、转台 5°/s 旋转时的有像移成像、转台 5°/s 旋转同时 FSM 进行像移补偿所成像。

表 1 不同转速时系统分辨率对比
Tab.1 System resolution comparison at different speeds

平台转速(°/s)	2	3	4	5
分辨率(cycles/mm)	13	13	13	12

6 结 论

针对传统像移补偿方案不满足当前新一代航空相机分辨率要求的技术难题,提出了基于 FSM 的像移补偿方案,给出的基于坐标变换的像移补偿速度解算方法比传统方案更为简化,针对 FSM 模型不确定性的缺点,提出并设计了 MRAC 控制器。实验验证所设计的 MRAC 控制器有效改善了 FSM 伺服系统的动态性能,阶跃响应稳定时间降低了 50% 以上,稳态误差也明显降低。鲁棒性实验证明即使在振动情况下 FSM 的稳定精度都可以达到 10 μrad,比传统控制方案精度提升了 10 倍以上。最终的像移补偿成像实验成功验证了基于快速反射镜的像移补偿方案有较高的工程应用价值。

参考文献:

[1] 李刚,杨名字. 基于联合变换相关的机载航空相机像移测量[J]. 中国光学, 2015, 8(3): 401-406.
LI G, YANG M Y. Image motion measurement for airborne camera based on joint transform correlation[J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(3): 401-406. (in Chinese)

[2] 张玉欣,刘宇,葛文奇. 像移补偿技术的发展与展望[J]. 中国光学与应用光学, 2010, 3(2): 112-118.
ZHANG Y X, LIU Y, GE W Q. Development and prospect of image motion compensation technology[J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2010, 3(2): 112-118. (in Chinese)

[3] 张丽,汤恩生,许敬旺. 空间相机像移补偿方法研究[J]. 航天返回与遥感, 2007, 28(3): 19-22, 32.
ZHANG L, TANG E SH, XU J W. Studies on the image motion compensation methods of space camera[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2007, 28(3): 19-22, 32. (in Chinese)

[4] 陈黎,翟林培,李友一. 基于航空遥感器像移补偿实现方法的研究[J]. 计算机测量与控制, 2009, 17(1): 154-155, 163.
CHEN L, ZHAI L P, LI Y Y. Research to realize aerial remote sensor image motion compensation[J]. *Computer Measurement & Control*, 2009, 17(1): 154-155, 163. (in Chinese)

- [5] 王德江, 董斌, 李文明, 等. TDI CCD 电荷转移对遥感相机成像质量的影响 [J]. 光学 精密工程, 2011, 19(10): 2500-2506.
WANG D J, DONG B, LI W M, *et al.*. Influence of TDI CCD charge transfer on imaging quality in remote sensing system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(10): 2500-2506. (in Chinese)
- [6] NOUGUÈS P O, BAIZE P, ROLAND F, *et al.*. Third-generation navalIRST using the step-and-stare architecture [J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 6940: 69401B.
- [7] AMON M, STOKES B. Stabilized step/stare scanning device: US, 5663825 [P]. 1997-09-02.
- [8] HELD K J, ROBINSON B H. TIER II Plus airborne EO sensor LOS control and image geolocation [C]. *Proceedings of 1997 IEEE Aerospace Conference*, IEEE, 1997.
- [9] 李永昌, 金龙旭, 李国宁, 等. 宽视场遥感相机像移速度模型及补偿策略 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(8): 1278-1286.
LI Y CH, JIN L X, LI G N, *et al.*. Image motion velocity model and compensation strategy of wide-field remote sensing camera [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(8): 1278-1286. (in Chinese)
- [10] 路朋罗, 李永昌, 金龙旭, 等. 大视场空间相机的像移速度场模型及卫星三轴姿态稳定度分析 [J]. 光学 精密工程, 2016, 24(9): 2173-2182.
LU P L, LI Y CH, JIN L X, *et al.*. Image motion velocity field model of space camera with large field and analysis on three-axis attitude stability of satellite [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(9): 2173-2182. (in Chinese)
- [11] DEY N, MONDAL U, MONDAL D. Design of a H-infinity robust controller for a DC servo motor system [C]. *Proceedings of 2016 International Conference on Intelligent Control Power and Instrumentation*, IEEE, 2016.
- [12] RHOUMA T, KELLER J Y, SAUTER D, *et al.* Active GLR detector for resilient LQG controller in networked control systems [J]. *IFAC-Papers OnLine*, 2015, 48(21): 754-759.
- [13] 张怡, 刘向杰. 互联电力系统鲁棒分布式模型预测负荷频率控制 [J]. 控制理论与应用, 2016, 33(5): 621-630.
ZHANG Y, LIU X J. Robust distributed model predictive control for load frequency control of uncertain power systems [J]. *Control Theory & Applications*, 2016, 33(5): 621-630. (in Chinese)
- [14] NGUYEN N, KRISHNAKUMAR K, BOSKOVIC J. An optimal control modification to model-reference adaptive control for fast adaptation [C]. *AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit*, AIAA, 2013: 705-741.
- [15] 黄元峰, 石云宝, 庞绍平, 等. MRAC-PID 复合控制在液力控制系统中的应用 [J]. 吉林工业大学自然科学学报, 2000, 30(4): 70-74.
HUANG Y F, SHI Y B, PANG SH P, *et al.*. Study on MRAC-PID control method and application in hydrodynamic control system [J]. *Natural Science Journal of Jilin University of Technology*, 2000, 30(4): 70-74. (in Chinese)
- [16] KAMNIK R, MATKO D, BAJD T. Application of model reference adaptive control to industrial robot impedance control [J]. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 1998, 22(2): 153-163.
- [17] WU G Q, WU SH N, BAI Y G, *et al.*. Experimental studies on model reference adaptive control with integral action employing a rotary encoder and tachometer sensors [J]. *Sensors*, 2013, 13(4): 4742-4759.
- [18] BÖHM M, DEMETRIOU M A, REICH S, *et al.*. Model reference adaptive control of distributed parameter systems [J]. *SIAM Journal on Control and Optimization*, 1998, 36(1): 33-81.
- [19] HAFEZ M, SIDLER T C, SALATHÉ R P, *et al.*. Design, simulations and experimental investigations of a compact single mirror tip/tilt laser scanner [J]. *Mechatronics*, 2000, 10(7): 741-760.
- [20] SWEENEY M N, RYNKOWSKI G A, KETABCHI M, *et al.*. Design considerations for fast-steering mirrors (FSMs) [J]. *Proceedings of SPIE*, 2002, 4773: 63-73.
- [21] 李贤涛, 张晓沛, 毛大鹏, 等. 高精度音圈快速反射镜的自适应鲁棒控制 [J]. 光学 精密工程, 2017, 25(9): 2428-2436.
LI X T, ZHANG X P, MAO D P, *et al.*. Adaptive robust control over high-performance VCM-FSM [J]. *Opt. Precision*

Eng., 2017, 25(9): 2428-2436. (in Chinese)

- [22] 赵磊, 纪明, 王明歆, 等. 快速反射镜驱动形式对伺服带宽的影响[J]. 光学精密工程, 2019, 27(2): 393-401.
ZHAO L, JI M, WANG M M, et al.. Influence of driving forms on servo bandwidth[J]. Opt. Precision Eng., 2019, 27(2): 393-401. (in Chinese)

作者简介:



王正玺(1989—),男,河北保定人,博士研究生,2014年于哈尔滨工业大学获得学士学位,主要从事光电平台视轴稳定控制技术研究。E-mail: ldh_wh@163.com



张葆(1966—),男,吉林磐石人,研究员,博士生导师,1989年、1994年于长春光机学院分别获得学士、硕士学位,2004年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事航空光电成像技术方面的研究。E-mail: clearsky_zh@163.com

《发 光 学 报》

—EI 核心期刊(物理学类;无线电电子学、电信技术类)

《发光学报》是中国物理学会发光分会与中国科学院长春光学精密机械与物理研究所共同主办的中国物理学会发光分会的学术会刊。该刊是以发光学、凝聚态物质中的激发过程为专业方向的综合性学术刊物。

《发光学报》于1980年创刊,曾于1992年,1996年,2000年和2004年连续四次被《中文核心期刊要目总览》评为“物理学类核心期刊”,并于2000年同时被评为“无线电电子学、电信技术类核心期刊”。2000年获中国科学院优秀期刊二等奖。现已被《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》和“万方数据资源系统”等列为源期刊。英国《科学文摘》(SA)自1999年;美国《化学文摘》(CA)和俄罗斯《文摘杂志》(AJ)自2000年;美国《剑桥科学文摘社网站》自2002年;日本《科技文献速报》(CBST, JICST)自2003年已定期收录检索该刊论文;2008年被荷兰“Elsevier Bibliographic Databases”确定为源期刊;2010年被美国“EI”确定为源期刊。2001年在国家科技部组织的“中国期刊方阵”的评定中,《发光学报》被评为“双效期刊”。2002年获中国科学院2001~2002年度科学出版基金“择重”资助。2004年被选入《中国知识资源总库·中国科技精品库》。本刊内容丰富、信息量大,主要反映本学科专业领域的科研和技术成就,及时报道国内外的学术动态,开展学术讨论和交流,为提高我国该学科的学术水平服务。

《发光学报》自2011年改为月刊,A4开本,144页,国内外公开发行。国内定价:40元,全年480元,全国各地邮局均可订阅。《发光学报》欢迎广大作者、读者广为利用,踊跃投稿。

地 址: 长春市东南湖大路3888号

《发光学报》编辑部

邮 编: 130033

电 话: (0431) 86176862, 84613407

E-mail: fgxbt@126.com

国内统一刊号: CN 22-4116/O4

国际标准刊号: ISSN 1000-7032

国内邮发代号: 12-312

国外发行代号: 4863BM

http: //www. fgxb. org