

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.07.003

基于 DOB 和 ZPETC 的 PWM 驱动快速 反射镜控制方法研究*

王福超, 田大鹏*, 王昱棠

(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)

摘要:针对高精度音圈电机快速反射镜 PWM 驱动方法存在的问题,对快速反射镜控制方法进行了研究。设计了基于干扰观测器 (disturbance observer, DOB) 和零相差跟踪控制器 (zero phase error tracking controller, ZPETC) 相结合的鲁棒控制方法。通过系统辨识实验建立了音圈电机快速反射镜的动态模型,利用半实物仿真平台对控制系统的动态性能进行了测试,给出了被控对象的实验记录测量数据及其开环幅频特性曲线 bode 图。研究表明,基于干扰观测器和零相差跟踪控制器的控制方法补偿了外部扰动、模型不确定性以及机械非线性等因素对控制系统性能的影响,系统带宽达到 150 Hz 以上,快速反射镜伺服系统能够满足光电跟踪系统对快速反射镜的快速性和高精度要求,新方法在性能上有显著的提高,在实际工程中具有较高的应用价值。

关键词:快速反射镜;音圈电机;干扰观测器;零相差跟踪控制器

中图分类号:TH74;TP273

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2015)07-0903-06

Control of fast-steering mirror driven by PWM based on DOB and ZPETC

WANG Fu-chao, TIAN Da-peng, WANG Yu-tang

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

Abstract: Aiming at the control method for the high precision fast steering mirror PWM-drive servo system, the fast steering mirror control method was researched, and a robust control strategy based on the combination of disturbance observer (DOB) with the zero phase error tracking controller (ZPETC) was proposed. The dynamic models of fast steering mirror were established through system identification experiments. The dynamic performance of fast steering mirror system were tested by semi-physical simulation test platform, the experimental measure data and bode diagram of the control system were provided. The results indicate that the control method based on DOB and ZPETC reduces the influences of the uncertainties, such as parameters perturbation, external load disturbances and mechanical nonlinearity. It enhances the robust performance of the controlled system, and the influence of imbalance torque is restrained, the proposed control algorithm reached more than 150 Hz bandwidth. The servo system for the fast-steering mirror can satisfy the system requirements of high precision and fast response for the photoelectric tracking system, and the test results with new algorithm has an obviously improvement on the performance and has high application value in practical engineer.

Key words: fast-steering mirror; voice coil actuator; disturbance observer (DOB); zero phase error tracking controller (ZPETC)

收稿日期:2015-02-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61304032)

作者简介:王福超(1988-),男,吉林磐石人,主要从事光电平台伺服控制方面的研究. E-mail:sevens_07@163.com

通信联系人:田大鹏,男,博士,副研究员. E-mail:d.tian@ciomp.ac.cn

0 引 言

随着航空成像设备的不断发展,成像设备的探测距离已由十几公里逐步提升至几十公里、甚至几百公里,随着探测距离的不断提升,对成像设备的稳定精度要求也越来越高。目前国内稳定平台所能达到的稳定精度在 $25 \mu\text{rad}$ (RMS),国外稳定精度可以达到 $5 \mu\text{rad}$ (RMS)。针对载体扰动的抑制问题,传统方法通过两轴两框架或两轴四框架结构隔离载体扰动,由于机械结构特性以及电机力矩限制,系统的带宽及稳定精度难以在本质上得到进一步提升。因此,通过引入复合轴系统实现高精度视轴稳定^[1-2]。复合轴结构是在大惯量跟踪架的主光路中装方位、俯仰均可微动的高谐振频率快速反射镜(fast steering mirror, FSM)^[3]。快速反射镜具有体积小、质量轻、结构紧凑、速度快、精度高、带宽高等优点^[4-5],广泛应用于空间光通信、像移补偿以及高精度跟踪瞄准等领域^[6-7]。快速反射镜通常采用压电陶瓷和音圈电机(voice coil motor, VCM)进行驱动^[8]。压电陶瓷驱动方式可以提供较大的力矩输出,以及高带宽响应,但该种驱动方式反射镜的角位移行程较小,并且驱动电路复杂、功耗高。基于音圈电机快速反射镜角位移行程较大,可以达到 $10^\circ \sim 15^\circ$ 范围,并且动态特性好。音圈电机通常采用 PWM 和线性放大器两种方式进行驱动。线性放大器驱动方式驱动器线性度较好,但驱动效率低、发热量大。PWM 驱动方式可以提高驱动器的效率,并且功耗较低。

传统的直流力矩电机通过引入电流闭环控制,可以改变速度回路控制对象的特性,提高控制系统的跟踪精度^[9-10],并且可以简化系统的数学模型。但由于音圈电机反射镜自身惯量较小,电机输出力矩较大,采用电流闭环方式进行驱动,音圈电机极易受到外界噪声以及控制电流噪声的影响,影响反射镜的控制精度。采用 PWM 电流开环驱动方式可以消除电流噪声的影响,但摩擦力矩、不平衡力矩以及模型摄动等因素都将影响控制器的实际实现效果^[11-12],反射镜通常不能满足高精度、高带宽、高刚度的要求。

为了获得更好的动态性能和刚度,本研究提出一种基于 ZPETC 及 DOB 的音圈电机快速反射镜控制器。笔者研究内容安排如下:

(1) 辨识高精度系统模型。根据系统动力学特性,建立系统模型的数学表达式。通过实验给出 PWM 驱动方式的特性。

(2) 控制算法设计。针对 PWM 驱动方式所存在

的问题,以及快速反射镜存在的扰动、模型摄动问题,建立基于干扰观测器的扰动抑制控制器,并且设计零相差前馈控制器,进一步提高系统的跟踪性能。

(3) 实验验证以及实验结果分析。通过扫频方式拟合出系统精确的数学模型,建立基于 ZPETC 和 DOB 的复合控制方法,并通过实验平台进行验证,分析实验结果。

1 系统模型

音圈电机是直线电机的一种,其体积较小、具有良好的动态响应特性、并且控制方便,因此特别适合高带宽、高精度的运动控制。音圈电机物理模型如图 1 所示。

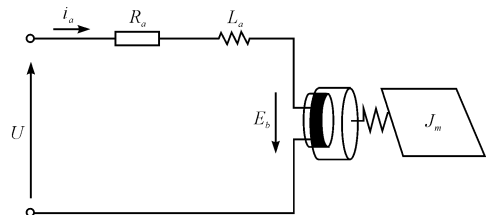


图 1 音圈电机物理原理图

在实际机械伺服系统中,机械谐振模态普遍存在,其产生原因是传动轴并非完全刚性,受力后发生弹性扭曲变形。对于音圈电机直接驱动伺服系统,考虑机械谐振模态的情况下,一般采用双质量体模型来描述系统动态。根据快速反射镜动力学特性建立系统方框图如图 2 所示。

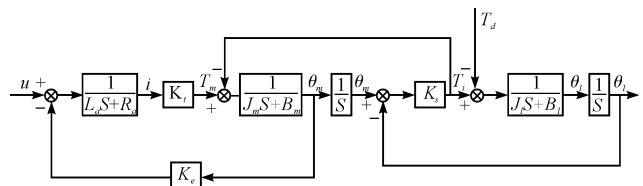


图 2 考虑谐振模态的快速反射镜系统框图

R_a —电枢电阻; L_a —电枢电感; i —电枢电流; K_e —反电动势系数; θ_m —电机转角; T_m —电机输出力矩; K_t —电磁转矩常数; J_m —电机转动惯量; B_m —电机端粘性阻尼系数; T_l —扭转力矩; K_s —转轴的机械刚度; J_l —负载转动惯量; B_l —负载端粘性阻尼系数; T_d —扰动力矩,包括摩擦力矩、耦合力矩及外部干扰力矩

本研究采用 PWM 电流开环方式驱动快速反射镜运动。在电流开环的情况下利用伪随机噪声作为模型辨识的输入信号,通过 Matlab 模型辨识工具箱对被控对象传递函数进行辨识,输入信号与输出信号如图 3 所示。辨识得到的快速反射镜电流开环系统模型如图 4 所示。

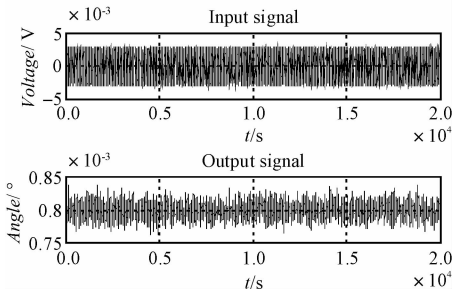


图3 电流开环系统辨识输入信号与输出信号

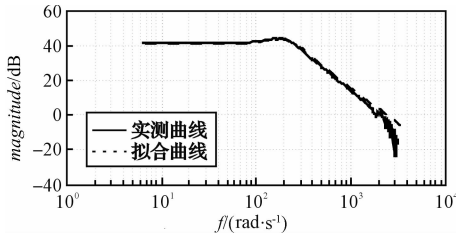


图4 快速反射镜电流开环系统模型

拟合得到系统传递函数:

$$G(s) = \frac{5.513 \times 10^6}{s^2 + 176.4s + 44100} \quad (1)$$

从图4的拟合结果可以看出系统在 200 rad/s 的频率点出现谐振峰值,因此需要加入阻尼系数消除该谐振点的影响。根据式(1)可知系统为二阶系统:

$$G(s) = \frac{k\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2)$$

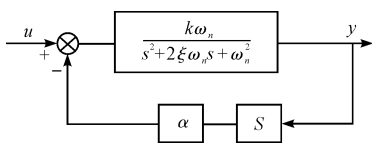


图5 加入阻尼系数环节

根据图5所示的框图可知,改变 α 的值可以改变系统的阻尼系数,消除系统的谐振点影响。通过计算取 $\alpha = 0.00003$ 拟合加入阻尼之后系统模型:

$$G(s) = \frac{6.627 \times 10^6}{s^2 + 385.4s + 55225} \quad (3)$$

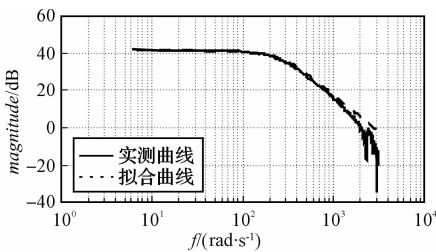


图6 加入阻尼后拟合结果

2 快速反射镜鲁棒控制系统

由于采用电流闭环的方式进行驱动使得驱动电流

的噪声较大,影响音圈电机的控制精度,本研究针对该问题采用电流开环的方式进行控制,并且采用 ZPETC 和 DOB 的复合控制方法提高反射镜的控制精度以及系统带宽。

Tomizuka M^[13] 在完全跟踪控制思想的基础上提出了零相位跟踪控制器^[14],ZPETC 方法可以提高系统的跟踪性能,有效地解决系统延时问题,但由于是开环控制,控制器的性能依赖被控对象数学模型的精确性。首先应对被控系统进行闭环控制,在一定程度上减小外界干扰以及被控对象模型参数变化对 ZPETC 控制性能的影响。干扰观测器^[15]是一种根据内模原理设计的控制方法,其能够检测出系统的干扰力和模型波动,并且克服机械非线性、摩擦以及模型参数变化对控制器性能的影响,并且能够使系统模型保持鲁棒性。为此,本研究设计了基于干扰观测器的鲁棒控制方法,克服了系统参数变化对系统性能的影响。在低频段使得实际被控对象的响应逼近名义模型的响应,在此基础上笔者采用 ZPETC 进行补偿,使系统相位为零,幅值近似为 1。

2.1 干扰观测器原理

干扰观测器的基本原理是测量外部力矩干扰及模型参数变化造成的实际对象与名义模型输出的差异,并将此估计值作用于系统达到消除干扰的目的。DOB 的基本原理图如图7所示。

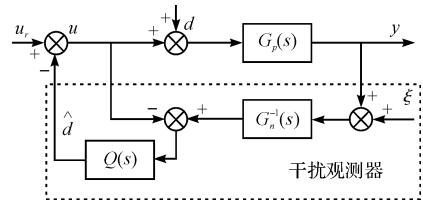


图7 干扰观测器原理框图

$G_p(s)$ —对象的传递函数; $G_p^{-1}(s)$ —稳定平台的的名义逆模型; $Q(s)$ —低通滤波器; d —等效干扰; \hat{d} —观测干扰; u —控制输入; ξ —检测噪声

系统的输出 y 为:

$$y = \frac{G_n G_p}{G_n + (G_p - G_n)Q} u_r - \frac{G_p Q}{G_n + (G_p - G_n)Q} \xi + \frac{G_n G_p (1 - Q)}{G_n + (G_p - G_n)Q} d \quad (4)$$

当系统被控对象和系统的标称模型相同的时候系统的输出 y 为:

$$y = G_n u_r - Q\xi + G_n (1 - Q)d \quad (5)$$

其中: $Q(s)$ —具有低通滤波特性,在低频段 $Q(s) = 1$,在高频段可以认为 $Q(s) = 0$ 。由式(5)可以看出在低频段即使系统存在干扰,系统也可保证较好的鲁棒性。

经过分析可知,带有干扰观测器的系统灵敏度函

数和补灵敏度函数为:

$$S(s) = \frac{G_n G_p(s) [1 - Q(s)]}{G_n(s) + [G_p(s) - G_n(s)] Q(s)} \quad (6)$$

$$T(s) = 1 - \frac{G_n G_p(s) [1 - Q(s)]}{G_n(s) + [G_p(s) - G_n(s)] Q(s)} \quad (7)$$

系统鲁棒稳定的充分必要条件是:

$$\| \Delta_M(j\omega) T(j\omega) \|_{\infty} \leq 1 \quad (8)$$

其中: $\Delta_M = G_p(s) - G_n(s)$ 。

由上式可以看出滤波器的设计结果直接影响干扰观测器的稳定性。

通常滤波器的设计结构如下:

$$Q_{NM}(s) = \frac{\sum_{k=0}^M \frac{N! (\tau s)}{(N-k)! k!}}{(\tau s + 1)^N}, M=0, 1, \dots, N-1 \quad (9)$$

式中: N —分母阶数, M —分子阶数。

在进行滤波器 $Q(s)$ 设计过程中对分子分母的阶数给予如下考虑:

(1) 对于谐振频率较高的系统, 可与选择较大的分子阶数来保证系统的抗干扰能力以及减小系统干扰估计的相位滞后。

(2) 若系统的谐振频率较低, 可以选择 $Q(s)$ 的分子阶数为 0, 再调整截止频率和分母阶数, 在抗干扰能力和稳定性之间折衷。

(3) 设计 $Q(s)$ 的分母时, 应使 $Q(s)$ 的相对阶不小于被控对象名义模型 $G_n(s)$ 的相对阶, 以保证 $Q(s) G_n^{-1}(s)$ 正则, 物理可实现。

2.2 零相差前馈控制控制器

为了提高系统的动态跟踪性能, Tomizuka 提出了 ZPETC, 其基本思想是基于零极点对消。其基本结构如图 8 所示。

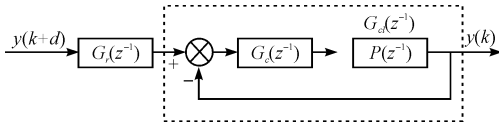


图 8 ZPETC 结构框图

$G_d(z^{-1})$ —被控对象闭环离散传递函数, $G_c(z^{-1})$ —闭环反馈控制器, $P(z^{-1})$ —被控对象的数学模型, $G_r(z^{-1})$ —零相差跟踪控制器

加入控制器的闭环系统经过双线性变换可以得到如下形式的离散传递函数:

$$G_d(z^{-1}) = \frac{z^{-d} B_c^a(z^{-1}) B_c^u(z^{-1})}{A_c(z^{-1})} \quad (10)$$

式中: z^{-d} —系统 d 步延时, $B_c^a(z^{-1})$ —闭环传递函数分子多项式中包含稳定零点的部分, $B_c^u(z^{-1})$ —分子多项

式中包含不稳定零点的部分。

考虑上述离散闭环传递函数, 设计 ZPETC 控制器:

$$G_r(z^{-1}) = \frac{z^d A(z^{-1}) B_c^u(z)}{B_c^a(z^{-1}) [B_c^u(1)]^2} \quad (11)$$

则整个系统的传递函数为:

$$G_w(z^{-1}) = \frac{B_c^u(z^{-1}) B_c^u(z)}{[B_c^u(1)]^2} \quad (12)$$

当 $z = e^{j\omega t}$ 时, 系统的传递函数为:

$$G_w(e^{-j\omega t}) = \frac{B_c^u(e^{-j\omega t}) B_c^u(e^{j\omega t})}{[B_c^u(1)]^2} = \frac{|B_c^u(e^{j\omega t})|^2}{[B_c^u(1)]^2} \quad (13)$$

从式可以看出传递函数是一个不含虚部的非负实数, 因此在系统的相移在整个频域内为 0, 在一定范围内幅值接近为 1。

3 实 验

本研究以音圈电机快速反射镜为对象进行了实验验证, 音圈电机如图 9 所示。实验平台原理框图如图 10 所示。控制系统以 HRT1000 半实物仿真系统为核心, 控制算法通过 Matlab Simulink 进行搭建, 并在 Vx-Works 实时操作系统上运行。控制信号通过 PCI 总线上的 16 位 D/A 转换卡与电机驱动器相连, 反馈信号通过 A/D 转换器进行采集, 系统的采样时间为 1 ms。

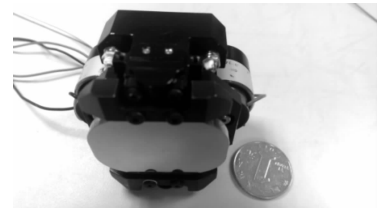


图 9 音圈电机驱动快速反射镜

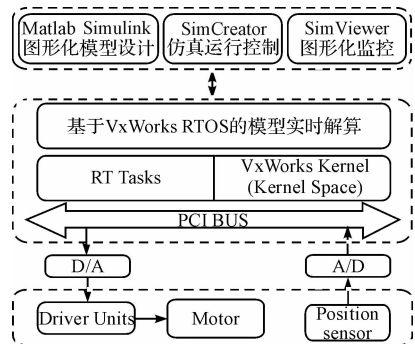


图 10 实验平台原理框图

首先, 本研究针对式(3)进行 DOB 和 PID 控制器设计。引入 DOB 和 PID 后的扫频结果如图 11 所示。考虑式被控对象的名义模型, 根据 3.1 节的论述设计滤波器 $Q(s)$, 本研究采用二阶滤波器形式, 并且取 $\tau = 0.0008$:

$$Q(s) = \frac{1}{6.4 \times 10^{-7} s^2 + 0.0016s + 1} \quad (14)$$

PID 控制器取 $k_p = 0.2, k_i = 15, k_d = 0$ 。针对引入 DOB 和 PID 控制器的闭环系统,通过正弦扫频的方式拟合获得系统闭环频率特性及传递函数:

$G(s) =$

$$\frac{-1.192 \times 10^7 s^2 + 1.757 \times 10^{10} s + 1.605 \times 10^{12}}{s^5 + 1.252 s^4 + 1.09 \times 10^6 s^3 + 2.559 \times 10^8 s^2 + 5.22 \times 10^{10} s + 1.618 \times 10^{12}} \quad (15)$$

接着设计 ZPETC。针对上述传递函数设计 ZPETC 控制器:

$$F(z^{-1}) = \frac{103.3 - 350.5z^{-1} + 447.2z^{-2} - 230.9z^{-3} - 14.28z^{-4} + 72.99z^{-5} - 32.13z^{-6} + 4.416z^{-7}}{1 - 0.7556z^{-1} - 0.1495z^{-2}} \quad (16)$$

针对上述设计的控制器,在反射镜 0 输入条件下系统的静态误差如图 12 所示。从图 12 中可以看出反射镜的静态误差为 $26.2 \mu\text{rad}$ 。采用 PWM 电流闭环方式的静态控制精度如图 13 所示。比较图 12 和图 13 结果可以看出,引入 ZPETC 和 DOB 后的静态控制精度明显高于电流闭环驱动方式。

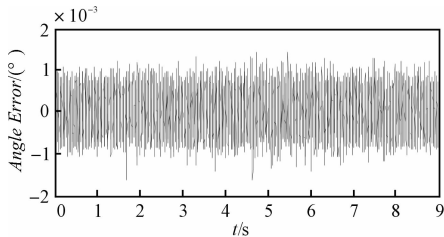


图 12 基于 ZPETC 和 DOB 控制的静态控制精度

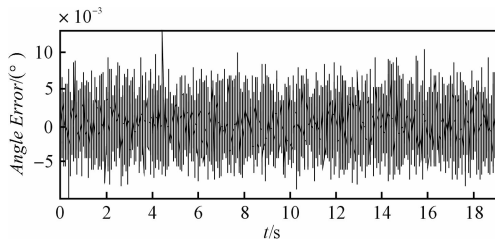


图 13 采用 PWM 电流闭环静态控制精度

加入 ZPETC 的闭环系统频率特性如图 14 所示。从实验结果可以看出加入 ZPETC 后反射镜的控制带宽可达到 150 Hz,采用 ZPETC + PID + DOB 的控制策略保证了反射镜电流开环的情况下有较高的定位、跟踪精度,并且有效地抑制了外界干扰对控制器性能的影响。

4 结束语

本研究针对音圈电机快速反射镜的 PWM 驱动方式设计基于 DOB 和 ZPETC 的控制方法,通过 DOB 克服了摩擦力矩、不平衡力矩以及模型不确定性的因素的干扰,提高系统的鲁棒性;同时通过设计 ZPETC,保

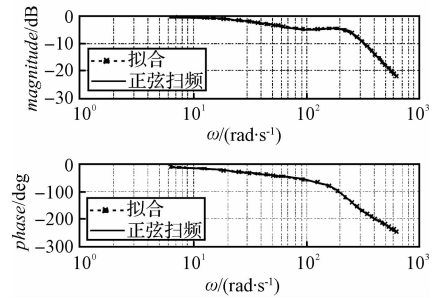


图 11 引入 DOB 和 PID 后的扫频结果

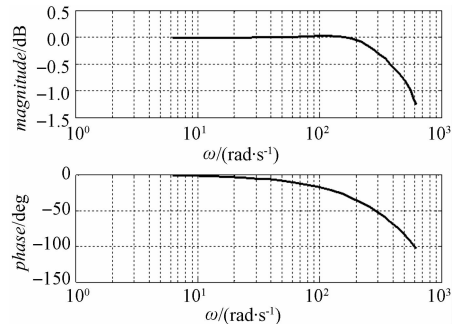


图 14 引入零相差之后系统的闭环频率特性

证了系统的快速性和跟踪精度。实验结果表明,笔者设计的控制算法能够很好地保证反射镜的跟踪性能,同时零相差前馈控制方法保证系统控制带宽达到 150 Hz,有效改善系统动态性能。

参考文献 (References):

- [1] 杨东,毛耀,丁科,等. 模型参考算法在快熟反射镜中的应用[J]. 红外与激光工程,2013,42(10):2790-2795.
- [2] 徐飞飞,纪明,解静,等. FSM 在高精度瞄准线稳定系统中的应用研究[J]. 应用光学,2012,33(1):9-13.
- [3] 彭树萍,于洪君,王伟国,等. 新型快速反射镜伺服系统设计[J]. 红外与激光工程,2014,43(5):1610-1615.
- [4] KLUK D, BOULTE M T, TRUMPER D L. A high-bandwidth, high-precision, two-axis steering mirror with moving iron actuator[J]. *Mechatronics*,2012(22):257-270.
- [5] 黑沫,鲁亚飞,张智永,等. 基于动力学模型的快速反射镜设计[J]. 光学精密工程,2013,21(1):53-61.
- [6] 鲁亚飞. 快速反射镜机械结构特性设计问题研究[D]. 长沙:国防科技大学机电工程与自动化学院,2009.
- [7] NÉSTOR O, ARANCIBIA P, GIBSON, et al. Frequency-weighted minimum-variance adaptive control of laser beam jitter[J]. *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, 2009, 14(3):337-348.
- [8] YU Hsing-cheng, CHEN Tsan-chen, LIU Chien-sheng. Adaptive fuzzy logic proportional-integral-derivative control for a miniature autofocus voice coil motor actuator with retaining

- force[J]. **IEEE Trans. Magn**, 2014, 50(11):243-250.
- [9] 黄永梅, 张 桐, 马佳光, 等. 高精度跟踪控制系统中电流环控制技术研究[J]. 光电工程, 2005(32):16-19.
- [10] 丁 涛. 一种光电转塔精确跟踪算法[J]. 兵工自动化, 2013(4):82-84.
- [11] LIU C-S, KO S-S, LIN P-D. Experimental characterization of high-performance miniature auto-focusing VCM actuator [J]. **IEEE Trans. Magn.**, 2011, 47(4):738-745.
- [12] TANG Tao, MA Jia-guang, REN Ge. PID-I controller of charge coupled device-based tracking loop for fast-steering mirror[J]. **Optical Engineering**, 2011, 50(4):643-655.
- [13] TOMIZUKA M. Zero phase error tracking algorithm for digital-control[J]. **Journal of Dynamic Systems Measurement and Control-Transactions of the Asme**, 1987, 109(1):65-68.
- [14] 李志军, 刘成颖, 孟凡伟, 等. 基于 ZPETC 和 DOB 的直线电机控制器设计及实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, (24):134-140.
- [15] OHNISHI K, SHIBATA M, MURAKAMI T. Motion control for advanced mechatronics[J]. **IEEE/ASME Transactions on Mechatronics**, 1996, 1(1):56-67.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

王福超, 田大鹏, 王昱棠. 基于 DOB 和 ZPETC 的 PWM 驱动快速反射镜控制方法研究[J]. 机电工程, 2015, 32(7):903-908.

WANG Fu-chao, TIAN Da-peng, WANG Yu-tang. Control of fast-steering mirror driven by PWM based on DOB and ZPETC [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2015, 32(7):903-908.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第 896 页)

滤波法和所提出算法的滤波效果。研究表明, 所提出的改进的邻域相关自适应滤波算法能更有效地滤除双能 X 射线透射信号中的噪声, 能更好地保证双能 X 射线透射分析法的准确性。

参考文献 (References):

- [1] MESINA M B, DE JONG T P R, DALMIJN W L. Automatic sorting of scrap metals with a combined electromagnetic and dual energy X-ray transmission sensor[J]. **International Journal of Mineral Processing**, 2007, 82(4):222-232.
- [2] 周仁忠, 阎吉祥. 光电统计理论与技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1989.
- [3] 周日峰, 张 平, 张泽宏, 等. 高能 X 射线探测器射线串扰模拟研究[J]. 核技术, 2005, 28(12):937-939.
- [4] 陈树越, 许九红. X 射线源量子噪声特性研究[J]. 核电子学与探测技术, 2013(7):886-889, 898.
- [5] 陈树越, 路宏年. X 射线数字成像噪声特性及噪声消除方法研究[J]. 无损检测, 2001, 23(1):9-12, 18.
- [6] 王东明, 卢虹冰, 张军英, 等. 基于统计特性的小波噪声抑制在低剂量 CT 中的应用[J]. 中国图象图形学报, 2008, 13(5):876-881.
- [7] 荣 锋, 苗长云, 徐 伟, 等. 高速 X 射线线阵探测器噪声分析与滤波方法[J]. 光电工程, 2013(8):64-72.
- [8] 赵 晓, 汪 明, 李晓明, 等. 改进扩展卡尔曼滤波算法在智能足球机器人比赛中的应用[J]. 机电工程, 2012, 29(3):334-338.
- [9] 陈 晨, 赵文宏, 徐慧鑫, 等. 基于卡尔曼滤波的 MEMS 陀螺仪漂移补偿[J]. 机电工程, 2013, 30(3):311-313, 321.
- [10] WANG Xue-wu, LI Jian-ming, KANG Ke-jun, et al. Material discrimination by high-energy X-ray dual-energy imaging[J]. **High Energy Physics and Nuclear Physics**, 2007, 31(11):1076-1081.
- [11] 黄 宇, 张晓芳, 俞 信. 光子成像系统信号与噪声的统计特性分析[J]. 光学技术, 2012, 38(3):340-346.
- [12] 郑 健, 俞俊鑫, 王 强. X 射线成像的物质分类识别算法的研究[J]. 计算机仿真, 2012, 29(10):288-292.
- [13] 常青青, 陈嘉敏, 沈天明, 等. 基于双能 X 射线的有效原子序数提取算法研究[J]. 计算机仿真, 2014, 31(2):297-301.
- [14] J·柯斯克能, 蔺春涛, 高 冬, 等. 线阵探测器(LDA)的现状与发展趋势[J]. CT 理论与应用研究, 2002, 11(3):12-15.
- [15] 张洁玉, 王 锋. 基于邻域信息的自适应中值滤波算法[J]. 计算机应用, 2014, 34(7):2010-2013, 2022.
- [16] LUO B, SUN Z, XUE M, et al. Improved noise reduction algorithms for medical X-ray images[C]//Consumer Electronics, Communications and Networks (CECNet), 2013 3rd International Conference on. IEEE, 2013:359-362.
- [17] 冯焕飞, 何友全, 刘 冲. 基于邻域相关的自适应中值滤波算法[J]. 重庆交通大学学报:自然科学版, 2013, 32(3):547-550.

[编辑:罗向阳]