

## 光电精跟踪系统音圈电机快反镜的预先修正控制

舒郁, 陈青山, 夏润秋, 刘力双

### Pre-amending and controllment of voice coil actuator fast steering mirror of opto-electronic fine tracking system

引用本文:

舒郁,陈青山,夏润秋,刘力双. 光电精跟踪系统音圈电机快反镜的预先修正控制[J]. *激光技术*, 2023, 47(6): 811–815.

SHU Yu, CHEN Qingshan, XIA Runqiu, et al. Pre-amending and controllment of voice coil actuator fast steering mirror of opto-electronic fine tracking system[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2023, 47(6): 811–815.

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### 1. 用于深空探测快速反射镜的电磁驱动

引用本文: 王毅刚, 刘力双, 康登魁, 等. 用于深空探测快速反射镜的电磁驱动[J]. *激光技术*, 2023, 47(2): 214–219.

### 2. 光电跟踪系统的区间2型模糊滑模控制方法

引用本文: 周倩, 张兵, 李志俊, 等. 光电跟踪系统的区间2型模糊滑模控制方法[J]. *激光技术*, 2023, 47(3): 293–300.

### 3. 基于温度闭环反馈的He-Ne激光器热稳频系统

引用本文: 缪鑫, 王琦, 邓勇, 等. 基于温度闭环反馈的He-Ne激光器热稳频系统[J]. *激光技术*, 2022, 46(6): 755–759.

### 4. 基于快速激光恒温区的热电偶时间常数的测量

引用本文: 郝晓剑, 刘亭剑. 基于快速激光恒温区的热电偶时间常数的测量[J]. *激光技术*, 2019, 43(6): 784–788.

### 5. 应用于精密光束指向系统的复合PID控制器研究

引用本文: 刘洋, 夏润秋, 吕勇. 应用于精密光束指向系统的复合PID控制器研究[J]. *激光技术*, 2018, 42(6): 868–872.

文章编号: 1001-3806(2023)06-0811-05

## 光电精跟踪系统音圈电机快反镜的预先修正控制

舒郁, 陈青山\*, 夏润秋, 刘力双

(北京信息科技大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100192)

**摘要:** 为了改善光电精跟踪系统的动态响应特性, 采用预先修正方法对快速执行器件音圈电机快反镜进行优化控制。在快反镜的闭环控制回路中增设前馈环节, 根据目标探测与识别环节给出的脱靶量实施预测式调节控制, 以加快执行速度; 介绍了基于快反镜的光电精跟踪系统的一般构成与工作原理, 给出了音圈电机快反镜的闭环控制模型, 并执行了前馈-反馈控制方法; 搭建了包括目标模拟、目标成像探测与识别、目标快速跟踪等功能部件的实验系统, 对上述方法进行了实验测试。结果表明, 系统延迟由 2.9 ms 缩短至 0.8 ms, 系统带宽由 20 Hz 提高至 45 Hz。该方法可以大幅压缩光电精跟踪系统的时间延迟, 提高系统带宽。

**关键词:** 激光技术; 音圈电机; 快反镜; 前馈-反馈控制

**中图分类号:** TP271 **文献标志码:** A **doi:**10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2023.06.012

## Pre-amending and controllment of voice coil actuator fast steering mirror of opto-electronic fine tracking system

SHU Yu, CHEN Qingshan, XIA Runqiu, LIU Lishuang

(School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China)

**Abstract:** A pre-amending method was studied and implemented to the fast steering mirror (FSM) execute component to improve the dynamic response characteristics of an opto-electronic fine tracking system based on voice coil actuator (VCA) FSM. A feedforward adjusting step was additionally applied for optimizing the control of the FSM according to the target position variation obtained by a target detection and recognition component. The configuration and principle of the opto-electronic fine tracking system based on FSM were described, and the control of the VCA driven fast steering mirror was modeled. Further, the feedforward-feedback control method was implemented. An experimental system consisting of a target simulation part, a target imaging and detection part, and a target tracking part was constructed to test and verify the method. The results show that the delay of the system is shortened from 2.9 ms to 0.8 ms, and the dynamic response bandwidth is improved from 20 Hz to 45 Hz. The pre-amending control method can significantly reduce the phase lag of the opto-electronic fine tracking system and improve the systematic response characteristic.

**Key words:** laser technique; voice coil actuator; fast steering mirror; feedforward-feedback control

### 引言

光电精跟踪系统是星间激光通信、光电对抗、精确制导、侦察告警等装备的重要部件<sup>[1-3]</sup>。其基本原理是通过接收光学天线以及成像组件, 连续快速获取跟踪目标的可见光或者红外波段的图像<sup>[4-6]</sup>; 通过配置了特定算法的嵌入式软、硬件模块对该图像进行实时计算处理, 以提取目标在视场中的坐标变动量, 也称作脱靶

量<sup>[7-9]</sup>; 该脱靶量被实时传送给控制模块, 作为引导值来控制一个高速高精度执行器件, 也称控制器, 通常是一个快反镜, 使之控制成像光轴做反向相对运动, 从而实现目标的高速精密跟踪。该方法具有抗电磁干扰能力强、隐蔽性好、以及跟踪精度高、速度快等优势。

光电精跟踪系统的延迟是一个重要指标, 直接影响系统跟踪的效果。要缩短光电精跟踪系统的延迟量, 提高跟踪系统的动态特性, 需要采用高速图像传感器压缩曝光或者积分时间、改进图像处理算法并提高嵌入式图像处理模块的计算速度, 以压缩信号处理延迟量, 使得控制系统具有稳定相位裕量。参考文献 [10]~参考文献 [12] 中采用中值滤波与形态滤波对

作者简介: 舒郁 (1998-), 男, 硕士研究生, 现主要从事光电探测的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: chenqss@sina.com

收稿日期: 2022-09-19; 收到修改稿日期: 2022-11-08

目标进行增强,然后计算目标的质心,进而提高了目标的提取精度和跟踪的鲁棒性,但会使得目标检测算法变得更加复杂,进而延长了计算时间。参考文献[13]~参考文献[15]中提高了采样频率,同时减少了图像传感器的曝光时间,进而减低信噪比,提高检测精度,但是降低了系统的稳定性。

压缩光电精跟踪系统延迟量的另一个有效途径是采用具有高动态特性的执行器件——快反镜(fast steering mirror, FSM),并通过改进的控制算法来提高其控制性能。参考文献[16]~参考文献[18]中采用模型参考算法来优化比例-积分-微分(proportion-integration-differentiation, PID)参数,但是算法的实现较为困难,并且性能提升不明显。参考文献[19]~参考文献[21]中采用模糊控制算法来选择最佳的PID参数,提高快反镜的动态响应,相反的是算法消耗的逻辑资源较多,实现补偿的延迟不明显。

常规PID反馈控制只有在偏差产生之后才对被控制参数进行调节,当扰动量的变化已经发生时,被控参数没有改变,控制器不会产生校正作用,这时整个跟踪系统都会具有较大延迟特性,控制系统的动态特性会出现抗干扰能力差、调节时间长及跟随误差大等缺点。因此想要提高系统的跟随性能,在系统的反馈控制回路中加入前馈通路,构成前馈控制和反馈控制相结合的控制系统,会极大地减少延迟特性,提高系统的跟踪性能。

综上所述,本文作者尝试在精跟踪控制器——快反镜的控制回路中设置前馈环节,通过预先调节的方式来改善光电精跟踪系统的迟滞特性,从而改善其闭环跟踪特性。

## 1 光电精跟踪系统

现代光电精跟踪系统通常包括光学天线、光束方向控制器(精跟踪执行器件)、高速图像传感器、嵌入式图像处理模块、中心控制器以及驱动控制模块等,如图1所示。光学天线将目标捕捉到视场范围内,高速图像传感器采集目标图像,并将图像数据传输给嵌入式图像处理模块。嵌入式图像处理模块接收图像数据

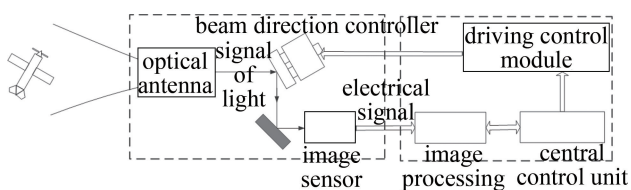


图1 光电精跟踪系统

Fig. 1 Opto-electronic fine tracking system

之后,提取图像中目标的中心位置,传输到驱动控制模块。驱动控制模块控制光束方向控制器做出相对运动,使得运动目标相对于视场稳定,即达到跟踪目的。

通常,光束方向控制器是一个响应速度快、指向精度高的快反镜,可以由音圈电机、压电陶瓷、磁致伸缩等执行元件驱动。一般快反镜的物理结构由柔性支持结构、反射镜、快反镜支架、快反镜基座、转角测量传感器、音圈电机以及主控模块等组成,如图2所示。

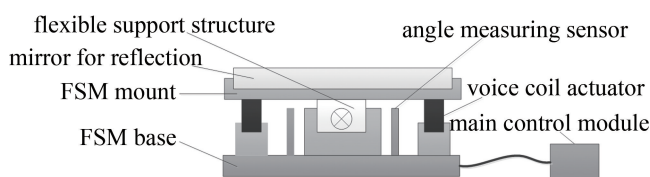


图2 快反镜构成

Fig. 2 Composition of FSM

音圈电机输出电磁力,通过非接触推-拉方式给出力矩,使得负载反射镜旋转,一般其数学模型可抽象表述为图3所示模型。图中, $s$ 为拉普拉斯变换的变量参数, $u$ 为输入的电压, $L$ 为线圈的电感, $R$ 为线圈的电阻, $i$ 为线圈的电流, $K_t$ 为电磁扭矩常数, $K_e$ 为反电动势系数, $T_m$ 为电机输出扭矩, $J_m$ 为电机的转动惯量, $B_m$ 为电机黏性阻尼系数, $\theta_m$ 为电机转角, $K_s$ 为柔性铰链的弹性系数。

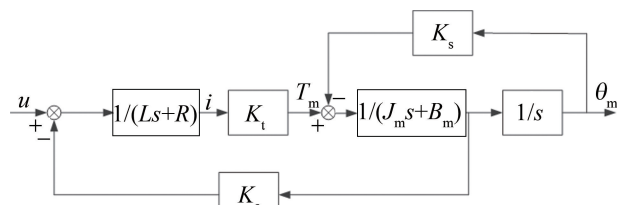


图3 音圈电机数学模型

Fig. 3 Mathematical model of voice coil actuator

可以推导得出快反镜的传递函数为:

$$\frac{\theta_m}{u} = \frac{K_t}{[(Ls+R)(J_m s + B_m) + K_t K_e]s + K_s(Ls+R)} \quad (1)$$

由于电机的电感非常小,因此经常忽略不计,所以(1)式可以化简成:

$$\frac{\theta_m}{u} = \frac{K_t}{R J_m s^2 + (R B_m + K_t K_e)s + K_s R} \quad (2)$$

## 2 快反镜的前馈-反馈控制

在闭环控制系统中,反馈控制仅在产生偏差时才对控制参数进行调节,具有一定的延迟特性,而前馈控制是在系统的输入端直接对控制器进行调节,具有预

见性,可以提高系统的动态响应速度,如图 4 所示。

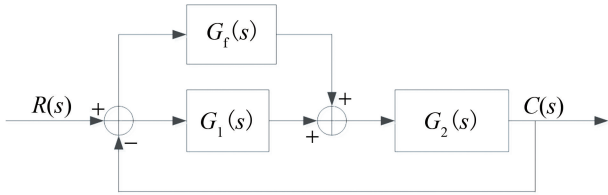


图 4 前反馈控制框图

Fig. 4 Block diagram of feedback forward control

前反馈控制的传递函数为:

$$H(s) = \frac{G_f(s)G_2(s) + G_1(s)G_2(s)}{1 + G_1(s)G_2(s)} \quad (3)$$

式中,  $G_f(s)$  表示前馈控制器,  $G_1(s)$  表示 PID 反馈控制器,  $G_2(s)$  表示快反镜的控制函数,  $R(s)$  表示输入,  $C(s)$  表示输出。从理论上分析, 当  $G_f(s) = 1/G_2(s)$ , 即  $H(s) = 1$ , 则使得系统的稳态误差为零, 并且可使输出复现输入信号。

位置前馈控制实际上是将输入信号的 1 阶微分和 2 阶微分信号作为系统的输入控制变量, 并结合反馈控制来获得更好的动态响应和延迟特性。位置前反馈控制可等效成如图 5 所示的控制环节。

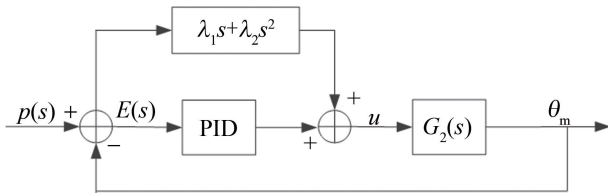


图 5 位置前反馈的控制方框图

Fig. 5 Control block diagram for position feedback forward

位置前馈控制器的传递函数可以表示为:

$$U(s) = k_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) E(s) + (\lambda_1 s + \lambda_2 s^2) p(s) \quad (4)$$

式中,  $U(s)$  为电压的拉普拉斯变换,  $k_p$  为比例系数,  $T_i$  为积分时间常数,  $T_d$  为微分时间常数,  $E(s)$  为误差的拉普拉斯变换,  $\lambda_1$  为 1 阶微分系数,  $\lambda_2$  为 2 阶微分系数,  $p(s)$  为位置的拉普拉斯变换。在数字控制系统中, 须将(5)式离散化, 可简单表示为:

$$U(k) = y_1(k) + y_2(k) + y_3(k) \quad (5)$$

其中,

$$\begin{cases} y_1(k) = k_p \left\{ e(k) + \frac{T}{T_i} \sum_{j=0}^k e(j) + \frac{T_d}{T} [e(k) - e(k-1)] \right\} \\ y_2(k) = \lambda_1 [p(k) - p(k-1)] \\ y_3(k) = \lambda_2 [p(k) - p(k-1) + p(k-2)] \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $y_1(k)$  为位置环 PID 的差分方程,  $y_2(k)$  为前馈速度环的差分方程,  $y_3(k)$  为前馈加速度环的差分方程,  $p(k)$  表示在第  $k$  个采样周期的采样位置输入,  $e(k)$  表示在第  $k$  个采样周期的采样位置偏差,  $U(k)$  表示在第  $k$  个采样周到的电压值,  $T$  表示为采样周期。

常规 PID 控制模式下, 光电精跟踪系统的延迟特性不可忽略。为此, 建立目标位置与音圈电机转角之间的关系, 在快反镜闭环控制回路中设置位置前馈环节, 从而实现预先修正。如图 6 所示, 控制系统的输入  $p_0$  是采集图像中所需跟踪的目标位置坐标, 也是图像控制环的输入, 通过 PID 控制器, 输出预期的位置, 反馈回路是图像目标跟踪的位置信息  $p_2$ , 位置控制环的输入是位置  $p_1$ , 通过 PID 控制器和位置前反馈控制, 输出为音圈电机的电压  $u$ , 反馈回路是音圈电机的转角信息。

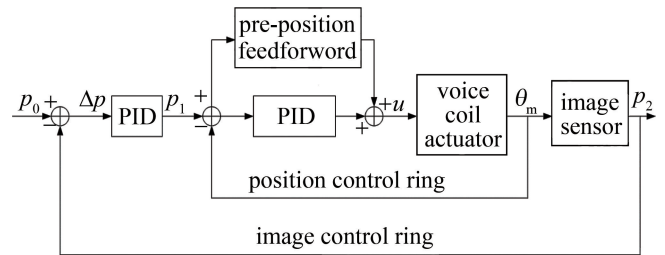


图 6 快反镜的前馈-反馈控制

Fig. 6 Feed forward-feedback control of the FSM

### 3 实验测试

为验证上述方法, 搭建如图 7 所示的测试系统。系统包括一个模拟目标的激光器和两个快反镜: 其中

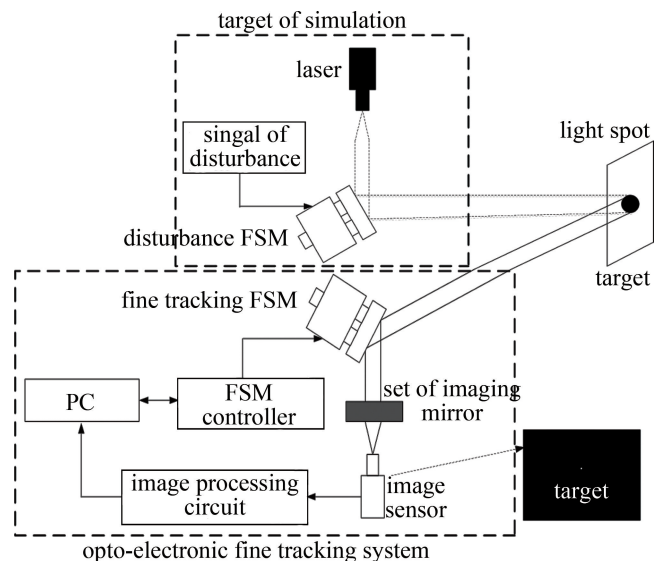


图 7 实验测试系统

Fig. 7 Experimental test system

一个用于控制激光光斑运动,从而模拟跟踪目标的运动;另一个则用于控制成像光束的高速运动,以锁定目标;系统还包括成像镜组、高速图像传感器、图像处理电路、上位机及快反镜控制器等。其中快反镜的口径为 25.4 mm,扫描范围 $\pm 3600''$ ,快反镜控制器基于 TMS320F28335 处理器的嵌入式数字控制器;图像处理电路以 KINTEX-7FPGA 为核心;图像传感最大分辨率为  $1280 \times 1024$ ,像素大小为  $4.8 \mu\text{m} \times 4.8 \mu\text{m}$ ,数据传输率为 620 Mbit/s,在全分辨率条件下可以达到每秒 150 帧图像的采集速度,且帧频可调。设定音圈电机位置环的 PID 系数分别为  $K_p = 0.33, K_i = 0.015, K_d = 0.00145$ ,1 阶前馈参数  $\lambda_1 = 0.045$ ,2 阶前馈参数  $\lambda_2 = 0.00003$ 。

目标模拟激光器的出射光经扰动快反镜反射后照射目标靶,扰动快反镜改变激光束方向,使得目标靶上光斑运动,模拟运动目标。高速图像传感器采集光斑图像,图像处理电路实时计算光斑位置的变动量,即脱靶量。将该脱靶量反馈给快反镜控制器,实时控制精跟踪快反镜随动,使得目标光斑相对于视轴稳定。

为了缩减图像处理电路所需实时处理的数据量,缩短计算处理时间,一般需要对所采集的图像进行开窗处理。开窗大小默认为  $1280 \times 1024$ ,通过上位机给图像处理电路发送开窗命令,使得开窗大小为  $640 \times 480$ 。其次,调整开窗的起始位置和结束位置,使得目标位置位于视场中心,实现目标锁定。

利用频谱分析和伪随机噪声的方法辨识精跟踪快反镜参数,可得到快反镜的实际传递函数,如下式所示:

$$G_2(s) = \frac{-2.84 \times 10^4}{s^2 + 1272s + 2.546 \times 10^4} \quad (7)$$

### 3.1 带宽测试

上位机下达指令,重复性地下达位置数组,引导系统做摆动幅值为  $60''$ 、频率为 1 Hz 的周期性往返运动。随后改变运动指令与引导数据,使得系统运动频率从 1 Hz~60 Hz 逐步提高,同时检测运动幅值随着频率的变化,算出系统闭环控制带宽。

分别对常规 PID 控制方法和前馈-反馈控制方法进行测试。测试结果表明,对于常规 PID 控制方法,当运动频率为 20 Hz 时,运动幅值下降到原先的 0.707 倍 ( $-3 \text{ dB}$ ) 的值为  $84.6''$ ,如图 8a 所示;对于所实施的前馈-反馈控制方法,当输入运动频率达到 45 Hz 时,运动幅值才下降到  $84.5''$  ( $-3 \text{ dB}$ ),如图 8b 所示。即系统带宽从 20 Hz 提升至 45 Hz,系统的动态响应特性得到了成倍的提升。

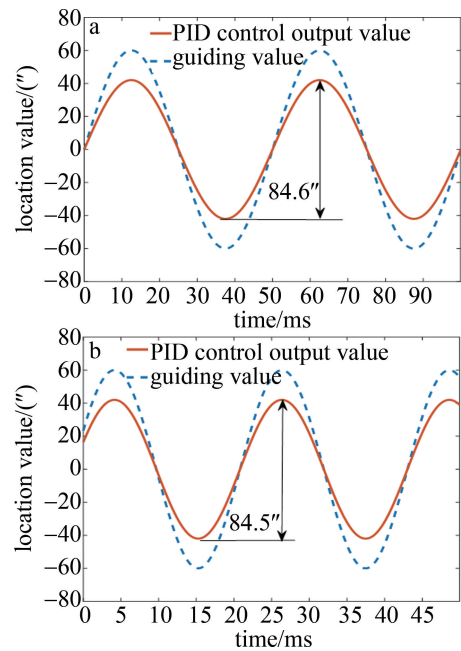


图 8 a—基于 PID 控制方法的 20 Hz 带宽测试结果 b—基于前馈-反馈控制方法的 45 Hz 带宽测试结果

Fig. 8 a—bandwidth test results based on the PID control method b—bandwidth test results based on the feedforward-feedback control method

### 3.2 延迟测试

从上位机发送指令使得光电精跟踪系统做周期性往返运动,运动频率 50 Hz、振幅  $100''$ 。如图 9 所示,分

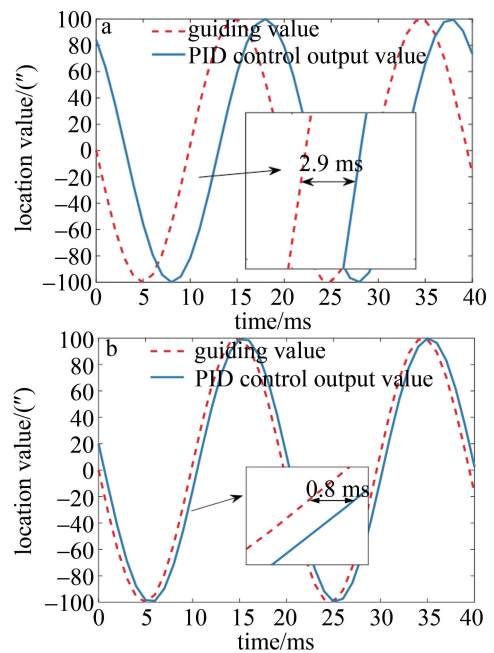


图 9 a—基于 PID 控制方法的延迟测试结果 b—基于前馈-反馈控制方法的延迟测试结果

Fig. 9 a—delay test results based on PID control method b—delay test results based on feedforward-feedback control method

别采用常规的PID控制法和前馈-反馈法来控制精跟踪快反镜,并测试系统响应的的时间延迟。可以看出,上述引导频率与振幅下,常规PID控制时时间延迟为2.9 ms,对应相位延迟52.2°;采用前馈-反馈控制法时时间延迟0.8 ms,对应相位延迟14.4°。相比于常规的PID控制方法,前馈-反馈控制法使得系统响应时间延迟特性得到了明显的改善。

## 4 结论

采用前馈-反馈控制方法来改进控制光电精跟踪系统的快反镜,即在系统控制回路中设置前馈通路,通过预先调节的方式来减小光电精跟踪系统的迟滞,改进光电精跟踪系统的动态响应特性。搭建了包括目标模拟、目标成像探测与识别、目标快速跟踪等功能部件的实验系统进行了实验测试。实验中测得系统延迟由2.9 ms缩短至0.8 ms,系统带宽由20 Hz提高到了45 Hz,表明该方法可以大幅压缩光电精跟踪系统的时间延迟,提高系统带宽。

## 参考文献

- [1] WANG Y, SAN X G. High-speed acquisition and real-time processing system for laser communication spot images[J]. Applied Laser, 2020, 40(1): 124-128(in Chinese).  
王莹, 伞晓刚. 激光通信光斑图像高速采集与实时处理系统[J]. 应用激光, 2020, 40(1): 124-128.
- [2] TANG T, HUANG Y M, FU C Y, *et al.* Acceleration feedback of a CCD-based tracking loop for fast steering mirror[J]. Optical Engineering, 2009, 48(1): 013001.
- [3] WANG Y K, HU L F, WANG Ch Ch, *et al.* Adaptive inverse control for tip/tilt mirror in adaptive optical system[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(8): 2203-2210(in Chinese).  
王玉坤, 胡立发, 王冲冲, 等. 自适应光学系统中倾斜镜的自适应逆控制[J]. 光学精密工程, 2015, 23(8): 2203-2210.
- [4] DENG Ch, REN W, MAO Y, *et al.* Plug-in module acceleration feedback control for fast steering mirror-based beam stabilization systems[J]. Optical Engineering, 2017, 56(8): 084105.
- [5] DONG Q R, CHEN T, GAO Sh J, *et al.* Identification of opto-electronic fine tracking systems based on an improved differential evolution algorithm[J]. Chinese Optics, 2020, 13(6): 1314-1323 (in Chinese).  
董全睿, 陈涛, 高世杰, 等. 光电精跟踪系统的改进差分进化算法研究[J]. 中国光学, 2020, 13(6): 1314-1323.
- [6] TONG W, ZHAO T, DUAN Q W, *et al.* Non-singleton interval type-2 fuzzy PID control for high precision electro-optical tracking system[J]. ISA transactions, 2022, 120: 258-270.
- [7] TANG T, MA J G, CHEN H B, *et al.* A review on precision control methodologies for optical-electric tracking control system[J], Opto-Electronic Engineering, 2020, 47(10): 3-31 (in Chinese).  
唐涛, 马佳光, 陈洪斌, 等. 光电跟踪系统中精密控制技术研究报告[J]. 光电工程, 2020, 47(10): 3-31.
- [8] WANG L, LIANG Sh N, WANG Ch Y. Improvement of response speed characteristics of fast steering mirror based on zero phase error tracking controller [C]//2020 39th Chinese Control Conference (CCC). Shenyang, China: IEEE, 2020: 1-6.
- [9] QIN Sh W, MAO Y, BAO Q L. Research on fuzzy II-order control method of photoelectric servo tracking systems [J]. Laser Technology, 2021, 45(2): 147-154(in Chinese).  
秦树旺, 毛耀, 包启亮. 光电跟踪系统的模糊II型控制技术研究报告[J]. 激光技术, 2021, 45(2): 147-154.
- [10] WANG Y K, LI D Y, WANG R, *et al.* High-bandwidth fine tracking system for optical communication with double closed-loop control method[J]. Optical Engineering, 2019, 58(2): 026102.
- [11] WANG Zh X, ZHANG B, LI X T, *et al.* Study on application of model reference adaptive control in fast steering mirror system[J]. Optik, 2018, 172: 995-1002.
- [12] LIN Ch J, LIN P T. Particle swarm optimization based feedforward controller for a XY PZT positioning stage[J]. Mechatronics, 2012, 22(5): 614-628.
- [13] DING K, HUANG Y M, MA J G, *et al.* Error adaptive feedforward composite control of fast-steering-mirror[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(7): 0705007(in Chinese).  
丁科, 黄永梅, 马佳光, 等. 快速反射镜的误差自适应前馈复合控制[J]. 中国激光, 2011, 38(7): 0705007.
- [14] KINGSBURY R W, NGUYEN T, RIESING K, *et al.* Fast-steering solutions for cubesat-scale optical communications[J]. Proceedings of the SPIE, 2014, 10563: 124-130.
- [15] HOU H L, ZHOU D Y, WANG W, *et al.* Application of fuzzy-PID control in system of photo-electric tracking [J]. Opto-Electronic Engineering, 2006, 33(5): 12-16(in Chinese).  
侯宏录, 周德云, 王伟, 等. 模糊PID控制在光电跟踪控制系统中的应用[J]. 光电工程, 2006, 33(5): 12-16.
- [16] HU Q B, LÜ Zh Y. Feed-forward position controller design of full-digitalized servo system [J]. Electric Drive, 2005, 35(5): 24-27 (in Chinese).  
胡庆波, 吕征宇. 全数字伺服系统中位置前馈控制器的设计[J]. 电气传动, 2005, 35(5): 24-27.
- [17] WAN M, ZHANG J R, NIE W J, *et al.* Precise pointing system using fast steering mirror[J]. Laser and Infrared, 1999, 29(3): 145-147(in Chinese).  
万敏, 张家如, 聂文杰, 等. 快速倾斜反射镜精跟踪系统[J]. 激光与红外, 1999, 29(3): 145-147.
- [18] TIAN J, YANG W Sh, PENG Zh M, *et al.* Application of MEMS accelerometers and gyroscopes in fast steering mirror control systems [J]. Sensors, 2016, 16(4): 440.
- [19] WANG R, WANG Y K, JIN Ch B, *et al.* Demonstration of horizontal free-space laser communication with the effect of the bandwidth of adaptive optics system [J]. Optics Communications, 2019, 431: 167-173.
- [20] XIA Y X, BAO Q L, WU Q Y. Internal model control of a fast steering mirror for electro-optical fine tracking [J]. Proceedings of the SPIE, 2010, 7843: 119-125.
- [21] TUO W X, LI X F, JI Y. High-bandwidth angular jitter measurement for acquisition, tracking and pointing system [J]. Proceedings of the SPIE, 2020, 11439: 88-95.