

文章编号 1004-924X(2015)08-2203-08

自适应光学系统中倾斜镜的自适应逆控制

王玉坤^{1*}, 胡立发¹, 王冲冲^{1,2}, 王少鑫¹, 宣 丽¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100039)

摘要: 为了克服自适应光学系统中倾斜镜的迟滞响应, 提高响应的线性度, 改善倾斜镜的控制精度, 研究了倾斜镜的迟滞非线性效应。提出了一个基于频率相关的 Mutified-Prandtl-Ishlinskii (MPI) 模型的补偿方法来在线自适应逆补偿倾斜镜的迟滞非线性。结合反馈 PID 控制构成了自适应逆前馈复合控制方案, 其中自适应逆前馈克服了由于频率等因素引起的迟滞曲线变化, 反馈 PID 则改善了整体的控制性能。建立了倾斜镜二阶系统模型来估计倾斜镜系统的输出, 解决了 MPI 模型参考信号的问题, 避免了增加额外前馈传感器, 保证了光能量的利用率。实验结果表明, 倾斜镜系统 15 Hz 非线性迟滞率由原来的 24.28% 降为 1.17%, 线性度提高了约 95%, 控制精度较传统 PID 方法提高了约 60%。该方法能够有效补偿倾斜镜的迟滞非线性, 提高了自适应光学系统中倾斜镜的校正精度。

关键词: 自适应光学系统; 倾斜镜; 自适应逆控制; 迟滞非线性; 控制精度

中图分类号: TP273.2; TH743 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152308.2203

Adaptive inverse control for tip/tilt mirror in adaptive optical system

WANG Yu-kun^{1,*}, HU Li-fa¹, WANG Chong-chong^{1,2}, WANG Shao-xin¹, XUAN Li¹

(1. State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics,
Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

* Corresponding author, E-mail: wangyukun@ciomp.ac.cn

Abstract: To overcome the hysteresis of a tip/tilt mirror (TTM) in an adaptive optical system and to improve its linearity and control precision, this paper researches the nonlinear effects of the TTM. A compensation method based on the frequency-dependent Mutified-Prandtl-Ishlinskii (MPI) model is proposed for online adaptive inverse compensation of the hysteresis nonlinearity of the TTM. By combining with PID feedback control algorithm, an adaptive inverse feedforward composite control algorithm is proposed. In which, the adaptive inverse feedforward overcomes the hysteresis curve changes due to the frequency factors, and the PID algorithm improves the overall control performance. A second-order model of the TTM is established to estimate the output of the TTM system, which solves the reference signals of the MPI model, avoids adding extra feedforward sensors, and ensures the utilization of light energies. Experiment results indicate that this algorithm effectively solves the problem

收稿日期: 2014-08-26; **修订日期:** 2014-10-30.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 11174274, No. 11174279, No. 61205021, No. 11204299, No. 61377032, No. 61378075)

of hysteresis nonlinearity of the TTM, the 15 Hz hysteresis ratio of the TTM falls from 24.28% to 1.17%, and the linearity is improved by about 95%. As compared with the traditional PID algorithm, the control precision has increased by about 60%. It concludes that this composite control algorithm can compensate the hysteresis nonlinearity of the TTM effectively, and the control precision of the TTM is improved in adaptive optical systems.

Key words: adaptive optical system; tip/tilt mirror; adaptive inverse control; hysteresis nonlinearity; control accuracy

1 引言

光波穿过大气时,大气湍流造成了折射率的随机起伏,使光波的位相和振幅发生畸变,光束质量显著变坏^[1]。自适应光学技术可以实时测量并补偿畸变的光学位相波前,改善光波在大气中传输的品质,因而被广泛应用于地基望远镜、激光大气通信、激光武器、人眼成像系统等,以便实时测量并补偿系统相差,提高光学系统的成像分辨率^[2-4]。倾斜镜在自适应光学中主要用于校正望远镜的跟踪过程中机架抖动和大气干扰等引起的视轴抖动,即光束波前畸变整体倾斜的校正。其具有行程小、谐振频率高、响应速度快等优点,可以弥补主系统的不足,与主系统共同构成复合轴跟踪系统,实现大范围、快速、高精度的波前校正。

倾斜镜主要由压电陶瓷和柔性结构构成,由于压电陶瓷的动态迟滞特性^[5],以及迟滞环的形状随频率变化而变化^[6],即它的频率相关性会严重影响倾斜镜的控制精度。倾斜镜通常采用积分控制方法^[7],通过闭环消除迟滞的影响;但是,波前倾斜包含多种频率成分,传统的积分控制很难达到理想的跟踪精度。为了解决该问题,必须对系统进行建模,减小迟滞非线性对控制系统的影响,从而实现倾斜镜的有效控制。目前,国内外用于迟滞建模及逆补偿的模型主要有物理模型^[8]、唯象模型^[9]和智能模型^[10-11]等,Mutified-Prandtl-Ishlinski(MPI)模型属于唯象模型,其结构简单,具有解析逆,且能反应迟滞非线性的动态特性。

为了解决压电陶瓷的迟滞问题,提高目标像抖动时倾斜镜的控制精度,本文设计了一种控制算法,它是包含 2 个控制器的复合控制系统,MPI 逆模型作为前馈自适应控制器,用于在线补偿倾斜镜的动态迟滞非线性,提高倾斜镜系统整体线性度;PID 作为反馈控制器,对整个倾斜镜进行控

制以改善整体控制性能。同时,建立倾斜镜二阶系统模型,利用倾斜镜系统模型输出估计波前整体倾斜量,该信号作为前馈自适应控制器的参考信号,避免了增加额外的传感器。实验结果表明,该方法能够有效补偿倾斜镜的迟滞非线性,提高了自适应光学系统中倾斜镜的校正精度。

2 自适应逆复合控制算法

从文献[12-15]可知,波前倾斜是在 20 Hz 内变化。因此,在设计倾斜镜的控制算法时,主要考虑以下因素:(1)倾斜镜的迟滞非线性及其频率相关性。为了进一步提高控制精度,必须在控制算法中加入前馈控制,利用测量的波前倾斜残差在线改变 MPI 逆模型参数,自适应补偿倾斜镜的迟滞非线性;(2)自适应光学系统实际使用的倾斜镜系统的光路。该光路是如图 1 所示的闭环光路,对于倾斜镜只有一个探测器,用来探测跟踪残差,因此,为了实现前馈补偿必须建立倾斜镜 1 系统模型,进而估计整体倾斜量作为前馈参考信号;(3)设计合适的 PID 控制器来改善系统整体控制性能。基于以上的考虑,本文提出了自适应逆补偿和 PID 的复合控制算法。

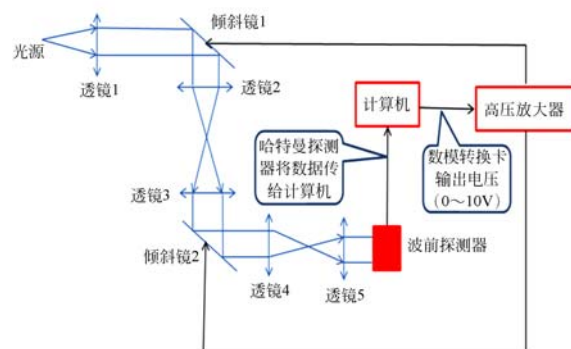


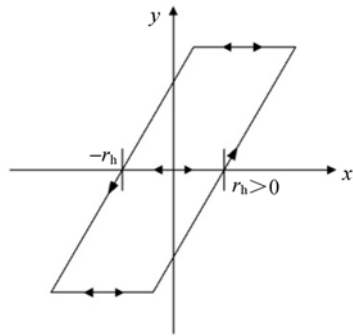
图 1 倾斜镜控制系统光路图

Fig. 1 Optical layout of TTM control system

2.1 改进的 Mutified-Prandtl-Ishlinskii (MPI) 模型及其逆模型

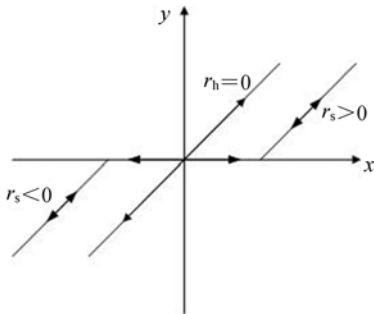
2.1.1 MPI 模型

MPI 模型是唯一像模型,根据实验数据拟合实际物理过程的输入输出关系。是由 Kuhnen 在传统 PI 模型上改进得到的^[9],其在原有 PI 模型的基础上串联一个具有无记忆性,非凸和非奇对称性质的死区算子,从而使得改进后的 PI 模型具有非局部记忆性,非凸和非奇对称等性质,能更清楚地描述实际物理过程。Play 算子及死区算子如图 2 所示。



(a) Play 算子

(a) Play operator



(b)死区算子

(b) Dead-zone operator

图 2 play 算子及死区算子

Fig. 2 Characteristics of play operator and dead-zone operator

Play 算子如图 2(a)所示,定义如下:

$$y(t) = H_{r_h}[x, y_0](t) = \max\{x(t) - r_h, \min\{x(t) + r_h, y(t_i)\}\}, \quad (1)$$

其中: $x(t)$ 是单调区间 $t_0 \leq t_1 \leq \dots \leq t_i \leq t_{i+1} \leq \dots \leq t_N$ 中分段单调输入信号, $y(t)$ 为算子输出。 $r_h \in$

R_0^+ 为算子的阈值。

死区算子如图 2(b)所示,定义如下:

$$S(x(t), r_s) = \begin{cases} \max\{x(t) - r_s, 0\}; r_s > 0 \\ x(t); r_s = 0 \\ \min\{x(t) - r_s\}; r_s < 0 \end{cases}, \quad (2)$$

其中: $r_s \in R$ 为死区算子的阈值。

将对称部分及非对称部分串联复合起来,得到 MPI 模型:

$$y(t) = \mathbf{I}[x](t) = \mathbf{w}_s^T \cdot \mathbf{S}_{r_s}[\mathbf{w}_h^T \cdot \mathbf{H}_{r_h}[x, y_0]], \quad (3)$$

其中, $\mathbf{r}_h = [r_{h_0} \dots r_{h_n}]^T, 0 = r_{h_0} < r_{h_1} < \dots < r_{h_n} < +\infty$ 为 play 算子阈值向量; \mathbf{w}_h^T 为 play 算子权向量; \mathbf{y}_0^T 为初始值向量; \mathbf{H}_{r_h} 为 play 算子向量。 $\mathbf{r}_s = [r_{s-l} \dots r_{s_0} \dots r_{s_l}]^T, -\infty < r_{s-l} < \dots < r_{s_0} = 0 < \dots < r_{s_l} < +\infty$ 为死区算子的阈值向量; \mathbf{w}_s^T 为死区算子权值向量; \mathbf{S}_{r_s} 为死区算子向量。

2.1.2 MPI 模型的逆

根据文献[11]中 MPI 模型具有解析逆, MPI 模型的解析逆为:

$$\mathbf{I}^{-1}[y](t) = \mathbf{w}_h^T \cdot \mathbf{H}_{r'_h}[\mathbf{w}_s^T \cdot \mathbf{S}_{r'_s}[y, y_0']](t), \quad (4)$$

其中: $r'_h \in R^{n+1}, r'_s \in R^{2l+1}, \omega'_s \in R^{2l+1}, \omega'_h \in R^{n+1}, y_0' \in R^{n+1}$ 是逆模型的相关参数,具体的求解方式参照文献[9]。

2.2 控制算法

2.2.1 基于 MPI 模型的自适应逆控制

MPI 有两层算子:外层的死区算子和内层的 play 算子。大量实验表明,对于迟滞的频率相关问题与死区算子无关,只与 play 算子的权值 ω_h 和 ω'_h 有关^[6]。于是,只要根据 MPI 模型输入参考信号和实际对象输出的偏差,实时地调整对象逆模型的 play 算子的权值,就能实时补偿动态的率相关迟滞问题。从式(4)可以看出, MPI 逆模型是典型的算子累加求和形式,所以可以使用自适应 LMS 算法对 play 算子的权值进行在线调整,具体 LMS 算法^[16]为:

状态向量:

$$\mathbf{x}(k) = \mathbf{H}_{r'_h}[\mathbf{u}](t) = (\mathbf{H}_{r'_{h_0}}[\mathbf{u}](t) \dots \mathbf{H}_{r'_{lm}}[\mathbf{u}](t)), \quad (5)$$

权值向量:

$$\mathbf{w} = \mathbf{w}'_h = (\omega'_{h_0} \dots \omega'_{lm}), \quad (6)$$

则权值迭代公式为:

$$\mathbf{w}(k+1) = \mathbf{w}(k) + 2\mu e(k) \mathbf{x}(k), \quad (7)$$

即:

$$\begin{aligned} \mathbf{w}_h^T(k+1) &= \mathbf{w}_h^T(k) + 2\mu e(k) \mathbf{H}_{r_h} [\mathbf{w}_s^T \cdot \\ &\quad \mathbf{S}_{r_s} [\mathbf{y}(k), \mathbf{y}'_0]]. \end{aligned} \quad (8)$$

逆控制器 LMS 参数收敛的条件是 $0 < \mu < \frac{1}{tr\mathbf{R}}$, 其中 $\mathbf{R} = E[\mathbf{x}(k) \mathbf{x}^T(k)]$ 为输入信号的自相关矩阵。从 play 算子的定义来看, 当输入有界时, $\mathbf{x}(k)$ 必然是一个稳定有界的向量。所以必然能找到 μ 满足 $0 < \mu < \frac{1}{tr\mathbf{R}}$, 于是算法参数收敛。最后, 从上面的分析看出只要选择一个合适的 μ 就能保证 LMS 算法收敛。

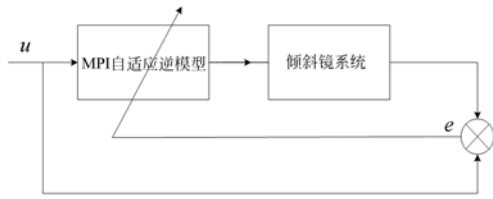


图 3 自适应逆控制原理图
Fig. 3 Block diagram of adaptive inverse control

图 3 所示为自适应逆补偿的控制系统框图, 其中 μ 为 MPI 逆模型的输入参考信号, e 为 MPI 模型参考信号和倾斜镜系统输出的偏差。

2.2.2 基于 MPI 模型的自适应逆复合控制

为改善系统的整体控制效果, 提高控制精度, 在前馈自适应逆中加入 PID 反馈回路。由图 3 可知, 波前残差信号用于改变自适应逆模型参数, 同时需要对波前信号进行测量, 而实际自适应光学系统中, 为了提高能量利用率, 不可以增加探测器, 所以只能获得波前的残差信号。为了解决这个问题, 采用试验建模的方法, 给系统施加某种测试信号, 记录输出响应, 并用适当的数学模型去逼近系统的输入输出, 从而对波前倾斜信号进行估计。

倾斜镜系统响应过程可以用二阶纯延迟环节近似表示为:^[17]

$$G_{TTM}(s) = \frac{k\omega^2 e^{-\tau s}}{s^2 + 2\epsilon\omega s + \omega^2}, \quad (9)$$

其中: k 为倾斜镜系统增益, ϵ 为二阶系统阻尼系数, ω 为二阶系统自然角频率, τ 为倾斜镜系统纯延迟时间。

倾斜镜自适应逆复合控制的总体控制方案如图 4 所示。 d 为标定信号, 通常为 0; r 为波前倾斜信号; y 为倾斜镜输出; y' 为由倾斜镜系统模型估计的输出; r' 为估计的湍流波前信号。PID 控

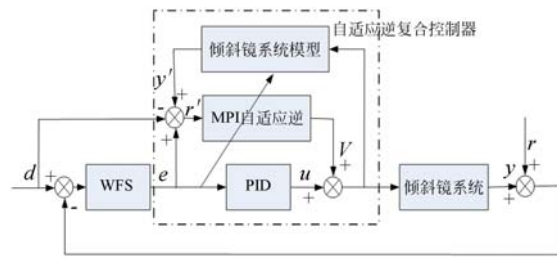


图 4 自适应逆复合控制原理图
Fig. 4 Block diagram of adaptive inverse composite control algorithm

制器根据 WFS 探测到的波前残差计算出驱动电压 u , 结合自适应逆前馈补偿器得到的驱动电压 V 直接施加给倾斜镜系统。

由图 4 可以得到:

$$e = d - r - y, \quad (10)$$

为使波前残差趋于 0, 估计的波前参考信号应满足 $r' = -r$, 所以:

$$r' = e + y' - d. \quad (11)$$

3 实验与结果

以 PI 公司的 S330.2SL 型压电倾斜镜为控制对象, 工业控制计算机为主控单元, 波前探测器为倾斜镜输出偏移量测量单元, 建立倾斜镜控制系统。S330.2SL 型压电倾斜镜的响应时间约为 1 ms, 波前探测器在帧转移模式下采样频率和压电倾斜镜施加电压频率都设置为 1.6 kHz, 实验光路如图 5 所示, 由倾斜镜 1 模拟波前的整体畸变, 倾斜镜 2 进行实时校正。

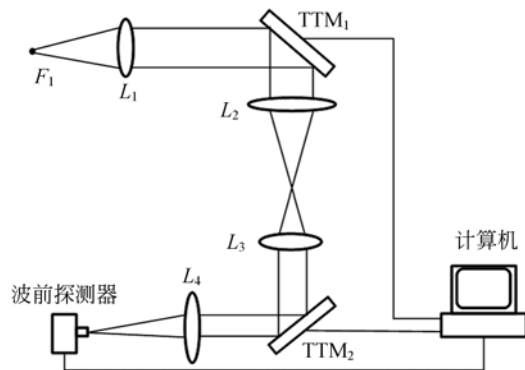


图 5 实验系统光路图
Fig. 5 Optical layout of experiment system

3.1 MPI 模型有效性检验

保持倾斜镜 1 不动,对倾斜镜 2 的迟滞响应曲线进行测量。由于波前整体倾斜的特点是频率低、幅度大^[12],因此给倾斜镜 2 施加频率为 7 Hz、15 Hz 和 30 Hz,电压从 4.8 V 增加到 5.2 V,然后再降到 4.8 V 的正弦信号。定义迟滞率 h_s 为迟滞回量的度量, $h_s = \Delta y / y_m$,其中, Δy 是迟滞回量最大值, y_m 是输出最大值,如图 6 所示。图 6 给出了实测的 TTM 迟滞响应曲线,TTM 响应迟滞率分别为 11.25%、24.28% 和 50.49%,根据该响应曲线建立 MPI 模型及其逆模型。

为检验 MPI 模型及其逆模型的有效性,将 MPI 逆模型与 TTM 系统串联,如图 7 所示,令模型中 $n=9, l=1$ 时的实验及建模曲线如图 8 所示。图中红色曲线为实验曲线,蓝色曲线为建模曲线(彩色图像见期刊电子版),建模均方根误差为 0.026 3 个像素,相对误差为 3.24%,得到补偿后滞回量为 2.61%,减小了近 78%,因此, MPI 模型及其逆模型可以很好地描述 TTM 的迟滞曲线并进行补偿。

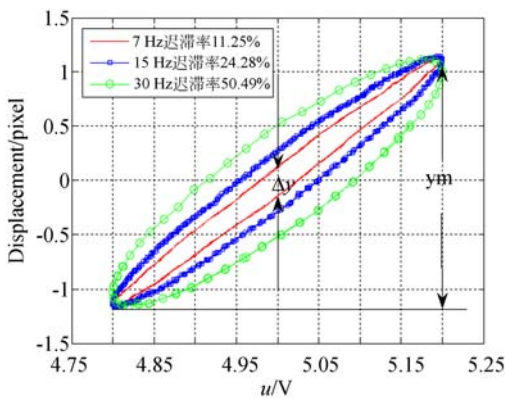


图 6 不同频率 TTM 迟滞特性曲线

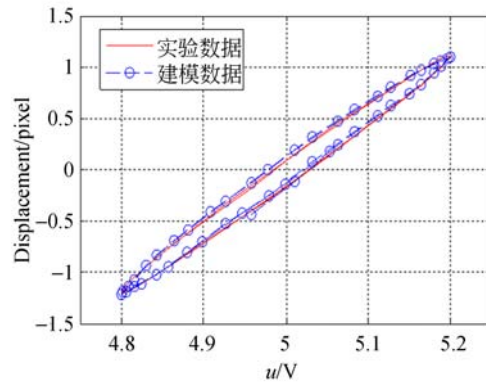
Fig.6 Hysteresis curve of TTM with different frequencies



图 7 MPI 逆补偿结构图

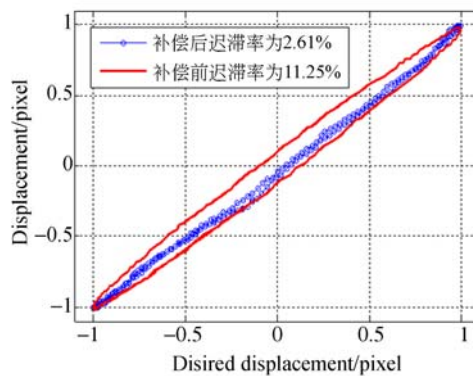
Fig.7 Block diagram of MPI inverse compensation

以 7 Hz 信号所建模型为初始 MPI 模型,倾斜镜 1 保持不动,给逆模型的输入端施加幅值为 1 V,频率为 15 Hz 的正弦信号,逆模型的输出施加到倾斜镜 2 的输入端,验证 MPI 模型对不同频



(a) MPI 模型建模效果

(a) MPI model



(b) MPI 逆模型补偿效果

(b) MPI inverse model

图 8 MPI 模型及其逆模型建模效果

Fig.8 Modeling results of MPI model and MPI inverse model

率迟滞问题的自适应逆补偿效果,如图 9 所示,对比了不补偿、直接逆补偿和自适应逆补偿效果。

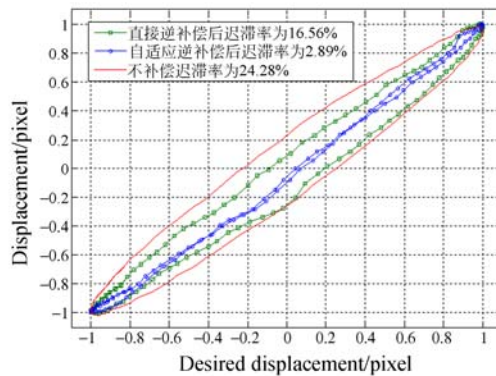


图 9 自适应逆补偿效果图

Fig.9 Compensation result of adaptive inverse model

15 Hz 信号滞回量为 24.28%，自适应逆补偿后滞回量为 2.89%，减小了近 90%，因此，MPI 自适应逆模型可以很好地适应迟滞曲线变化。

3.2 倾斜镜系统模型精度检验

倾斜镜 1 保持不动，给倾斜镜 2 加阶跃电压，得到倾斜镜 2 的输出，拟合得到倾斜镜系统的传递函数为：

$$G_{TTM}(s) = \frac{3.591e^{-0.000905s}}{(6.476e-7s)^2 + 0.0016092s + 1} \quad (12)$$

为检验模型精度如图 10 所示，给倾斜镜 2 加幅值为 0.5 V，频率为 1 Hz 的正弦信号，对比模型输出和倾斜镜输出，均方根误差为 0.035 pixel，建模精度达 98%，可以用于自适应逆的参考信号。

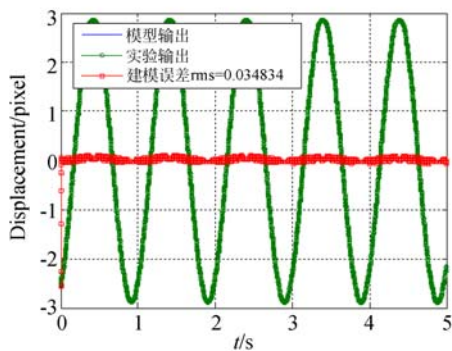
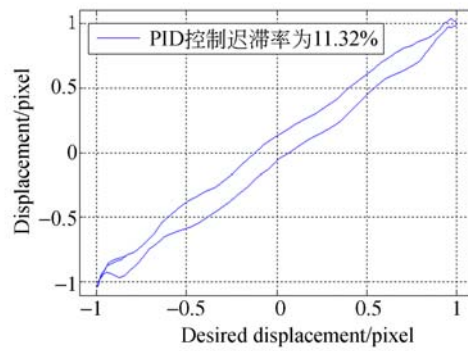


图 10 倾斜镜系统模型建模效果
Fig. 10 Modeling result of TTM system model

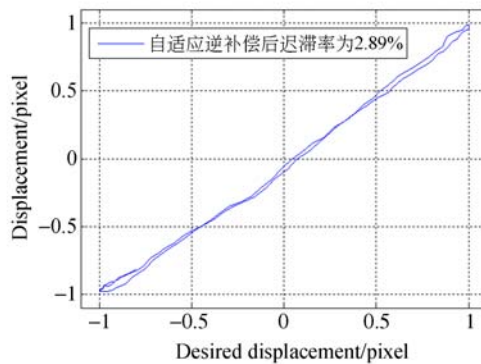
3.3 自适应逆复合控制算法验证

为了验证设计算法的有效性，倾斜镜 1 作为信号源产生幅度为 1 个像素，频率为 15 Hz 的正弦信号，模拟湍流整体倾斜，倾斜镜 2 作为波前校正器，校正由倾斜镜 1 产生的波前畸变。同时分别使用传统 PID，自适应逆补偿和自适应逆补偿结合 PID 反馈 3 种控制算法对倾斜镜进行控制，比较控制结果如图 11 所示。

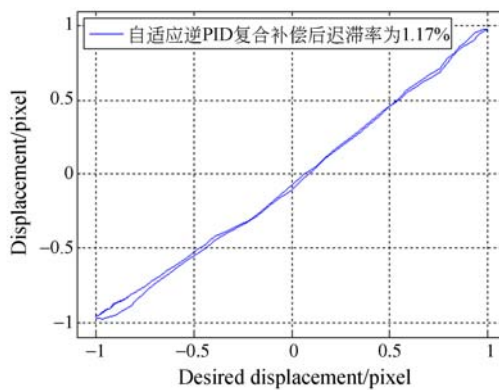
结果可以看出，自适应逆控制能够根据偏差自我调节参数，适应不同频率迟滞环的变化，由于解决了迟滞非线性问题，倾斜镜适应了迟滞回线的变化，结合 PID 反馈调节，迟滞率由原来的 24.28% 降为 1.17%，整体线性度提高约 95%。传统 PID 控制均方根误差为 0.081 pixel，自适应逆补偿均方根误差为 0.046 pixel，自适应逆补偿



(a) 传统 PID 控制
(a) Traditional PID control



(b) 自适应逆控制
(b) Adaptive inverse control



(c) 自适应逆补偿加反馈 PID 控制
(c) Adaptive inverse and feedback PID composite control

图 11 控制效果对比

Fig. 11 Control result comparison of different algorithms

加反馈 PID 控制均方根误差为 0.034 pixel，控制精度较传统 PID 提高约 60%。

4 结 论

倾斜镜迟滞效应的补偿是克服迟滞非线性,提高倾斜镜控制精度的关键,本文采用基于MPI模型的补偿方法对倾斜镜的迟滞效应进行前馈补偿,验证了MPI模型的准确性,并采用LMS算法改进MPI模型中play算子权值,自适应地补偿由于不同信号频率等因素引起的迟滞曲线变化。根据自适应光学系统的特点,建立了精确的二阶

倾斜镜系统模型,设计了自适应逆补偿反馈PID的控制方案。该方案简单且容易实现,易于在计算机上实现高速运算,有利于满足实时控制要求。实验表明,15 Hz非线性迟滞率由原来的24.28%降为1.17%,线性度提高了约95%,控制精度较传统PID方法提高了约60%。结果显示该方案能够有效地解决倾斜镜的迟滞非线性问题,适应波前倾斜的变化,提高整体线性度,提高了自适应光学系统中倾斜镜的校正精度。

参考文献:

- [1] 张逸新, 迟泽英. 光波在大气中的传播与成像[M]. 北京: 国防工业出版社, 1997.
ZHANG Y X, CHI Z Y. *Transmission and Imaging of Light Wave in Atmosphere*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1997. (in Chinese)
- [2] HARDY J. Active optics: a new technology for the control of light[J]. *Proc. IEEE*, 1978, 66(6): 651-697.
- [3] 姜文汉, 张雨东, 饶长辉, 等. 中国科学院光电技术研究所的自适应光学研究进展[J]. 光学学报, 2011, 31(9): 0900106.
JIANG W H, ZHANG Y D, RAO CH H, et al.. Progress on adaptive optics of institute of optics and electronics chinese academy and sciences[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(9): 0900106. (in Chinese)
- [4] 孔宁宁, 李大禹, 夏明亮, 等. 开环双脉冲液晶自适应光学视网膜成像系统[J]. 光学学报, 2012, 32(10): 0111002.
KONG N N, LI D Y, XIA M L, et al.. Liquid crystal adaptive optics system for retinal imaging operated on open-loop and double-pulse mode[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(10): 0111002. (in Chinese)
- [5] 张涛, 孙立宁, 蔡鹤皋. 压电陶瓷基本特性研究[J]. 光学精密工程, 1998, 6(5): 26-32.
ZHANG T, SUN L N, CAI H G. Study on the fundamental characteristics of piezoelectric element[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1998, 6(5): 26-32. (in Chinese)
- [6] 金桩. 压电智能作动器率相关迟滞非线性建模与控制研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2010.
JIN ZH. *Modeling and Control of Rate-dependent Hysteresis for Piezoelectric Smart Actuators*[D]. Beijing: Beihang University, 2010. (in Chinese)
- [7] TANG T, MA J G, REN G. PID-I controller of charge coupled device - based tracking loop for fast-steering mirror [J]. *Optical Engineering*, 2011; 50(4), 043002.
- [8] HAN J M, ADRIANS T A, WILLEM L, et al.. Modeling Piezoelectric Actuators[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2000, 5(4), 331-341.
- [9] KLAUS K. Modeling, Identification and compensation of complex hysteresis nonlinearities a modified prandtl-ishlinskii approach [J]. *European Journal of Control*, 2003, 9(4), 407-418.
- [10] 丁海山. 复杂系统的智能化建模与控制[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2007.
DING H SH. *Intelligent Modeling and Control of Complex systems* [D]. Beijing: Beihang University, 2007. (in Chinese)
- [11] 王冲冲, 胡立发, 何斌, 等. 基于神经网络的压电倾斜镜磁滞补偿方法研究[J]. 中国激光, 2013: 40(11), 1113001.
WANG CH CH, HU L F, HE B, et al.. Hysteresis compensation method of piezoelectric steering mirror based on neural network[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013: 40(11), 1113001. (in Chinese)
- [12] TYLER G A. Bandwidth consideration for tracking through turbulence[J]. *J. Opt. Soc. A m.*, 1994, 11(1): 358-367.
- [13] DARRYL P, GREEN W. Bandwidth specification for adaptive optics systems[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1977, 67(3): 390-393.
- [14] 刘超, 胡立发, 穆全全, 等. 水平大气通道的光波前倾斜功率谱的测量及其频率分析[J]. 激光与光电子学进展, 2011, (48): 020101-1-6.
LIU CH, HU L F, MU Q Q, et al.. Tilt power

- spectra measurements and frequency analysis of disturbed wave front in horizontal turbulence[J]. *Laser and Opt electronics Progress*, 2011, (48): 020101-1-6. (in Chinese)
- [15] 李新阳,姜文汉,王春红,等. 激光大气水平传输湍流畸变波前的功率谱分析 I: 波前整体倾斜与泰勒频率[J]. 光学学报, 2000, 20(7):883-889.
LI X Y, JIANG W H, WANG CH H, *et al.*. Power spectra analysis of the disturbed wave front in laser beam horizontal atmospheric propagation I: wavefront overall tilt and tyler frequency [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, 20(7): 883-889. (in Chinese)
- [16] BERNARD W, EUGENE W. *Adaptive Inverse control* [M]. American:Prentice-Hall, 1996, 114-117.
- [17] VÉRAN J P, HERRIOT G. Woofer-tweeter tip-tilt control for NFIRAOS on TMT [J]. *Proc. of SPIE* 6272:62721R-1.
- [18] 丁科,黄永梅,马佳光,等. 抑制光束抖动的快速反射镜复合控制[J]. 光学 精密工程, 2011, 19(9): 1991-1998.
- DING K, HUANG Y M, MA J G, *et al.*. Composite control of fast-steering-mirror for beam jitter [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(9):1991-1998. (in Chinese)
- [19] 陈浩,宣丽,胡立发,等. 1 200 mm 望远镜开环液晶自适应光学系统设计[J]. 光学 精密工程, 2010, 18(1):29-36.
CHEN H, XUAN L, HU L F, *et al.*. Design of open-loop liquid crystal adaptive optical system for 1 200 mm telescope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(1):29-36. (in Chinese)
- [20] 刘超,胡立发,穆全全,等. 校正水平湍流波面的自适应光学系统的带宽需求[J]. 光学 精密工程, 2010, 18(10):2137-2142.
LIU CH, HU L F, MU Q Q, *et al.*. Bandwidth requirements of adaptive optical system for horizontal turbulence correction [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(10):2137-2142. (in Chinese)

作者简介:



王玉坤(1988—),男,内蒙古呼伦贝尔人,硕士,研究实习员,2013年于北京航空航天大学获得硕士学位,主要从自适应光学系统中自动控制方面的研究。
E-mail: wangyukun@ciomp.ac.cn

导师简介:



宣丽(1957—),女,江苏常州人,博士,研究员,博士生导师,1983年于吉林大学获学士学位,1986年于中国科学院长春物理研究所获硕士学位,1998年于日本东北大学获博士学位,主要从事液晶自适应光学、液晶光学器件及液晶高分子化学等方面的研究。E-mail: xuanli@ciomp.ac.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)