

波前校正的变论域模糊控制方法

张亦睿, 陈波, 周益林, 贾晶晶, 李赵仪
(华北理工大学 电气工程学院, 河北 唐山 063210)

摘要:自适应光学校正技术中常用的PID控制依赖于变形镜的响应模型,响应模型易受扰动影响因此标定过程较为复杂。针对此问题提出一种不依赖变形镜响应模型的变论域模糊控制方法,将哈特曼重构波前中提取的波面评价指标的残差参数与残差差分参数作为变论域模糊控制器的输入,对输出的比例积分微分参数进行自整定,实现自适应控制。利用Matlab进行变论域模糊控制方法与传统模糊控制方法进行对比的相关仿真。波前校正实验结果表明,变论域方法校正后波面数据优于传统模糊控制方法,波前残差的均方根值也更小。控制器系统性能实验中,传统模糊控制器的超调量偏大,而变论域模糊控制器的超调量几乎为零,调节时间也更短。变论域模糊控制方法在保证系统的鲁棒性,提升系统的快速性的同时,利用参数自整定的特性克服了扰动因素对变形镜响应模型造成的不利影响,提高了校正效率,对于波前校正更具有实用性。

关键词:自适应光学;波前校正;变形镜;变论域;模糊控制

中图分类号:TH74;TP391.41 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2023.11.021

Variable domain fuzzy control method for wavefront correction

ZHANG Yi-rui, CHEN Bo, ZHOU Yi-lin, JIA Jing-jing, LI Zhao-yi

(College of Electrical Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China)

Abstract: The PID control commonly used in adaptive optical correction technology depends on the response model of the deformable mirror, which is susceptible to disturbance, making the calibration process more complex. To address this problem, a fuzzy control method based on variable domain is proposed which does not depend on the response model of the deformable mirror. The residual parameters of the wavefront evaluation index extracted from the Hartmann reconstructed wave front and the residual difference parameters are taken as the input of the fuzzy controller in variable domain, and the proportional integral and differential parameters of the output are self-tuned to realize the adaptive control. Matlab is used to compare the variable domain fuzzy control method with the traditional fuzzy control method. The experimental results of wavefront correction show that the wavefront data corrected by the variable domain method is better than that of the traditional fuzzy control method, and the root-mean-square value of the wavefront residual is also smaller. In the controller system performance experiments, the overshoot of the traditional fuzzy controller is larger, while the overshoot of the variable domain fuzzy controller is almost zero, and the adjustment time is shorter. The variable domain fuzzy control method not only guarantees the robustness of the system and improves the rapidity of the

基金项目:河北省自然科学基金项目(No. F2019209443);河北省教育厅科技计划项目(No. QN2018039)资助。

作者简介:张亦睿(1997-),男,硕士研究生,研究方向为自适应光学技术。E-mail:894416121@qq.com

通讯作者:陈波(1984-),男,博士,教授,硕士生导师,主要从事自适应光学与光电检测技术。E-mail:chenbo182001@163.com

收稿日期:2023-02-28;修订日期:2023-04-11

system, while utilizing the characteristics of parameter self-tuning to overcome the unfavorable effects of disturbance factors on the response model of the deformed mirror, and improves the correction efficiency, which is more practical for the wavefront correction.

Keywords: adaptive optics; wavefront correction; deformable mirror; variable domain; fuzzy control

1 引言

自适应光学系统主要分为无波前探测型和波前探测型^[1], 基于哈特曼-夏克(Hartmann-Shack, H-S)传感器的波前探测系统目前仍广泛应用于高速实时校正技术中^[2], 利用比例-积分-微分(Proportion-integral-differential, PID)算法即可实现较好的效果^[3]。但传统的PID控制依赖于变形镜的响应模型^[4], 响应模型易受扰动影响因此标定过程较为复杂。针对此问题, 2017年刘章文等人^[5]提出了一种模糊PID控制方法, 该方法利用波面加权模板^[5], 无需对响应矩阵进行标定, 摆脱了对变形镜对响应模型的依赖^[6], 证实了模糊PID控制应用于波前校正的可行性。2020年, 张丹玉^[7]提出一种双重模糊PID算法, 该算法更加灵活, 提高了系统的自适应性, 但输入输出论域的选取要根据实验环境使用专家经验法判定, 不合适的论域选取会影响波面评价指标^[7]进而影响系统校正效果。2021年, 程爽^[8]提出一种基于PID控制的残差校正畸变算法, 应用于大幅度畸变波前校正^[8], 实现了对畸变变量中除周期扩展外残差部分的消除, 但仍需对响应矩阵进行分析, 计算量较为复杂。

针对上述问题提出一种变论域模糊控制(Variable

domain fuzzy control)方法, 对波前校正过程进行了优化。变形镜的每一个驱动器都有独立的变论域模糊推理过程, 对比例、积分、微分系数分别进行自整定, 也就无需对变形镜的响应模型进行标定, 同时具有更高的自适应性。波前校正实验的结果表明, 经变论域模糊控制校正后波面的波前峰谷值(Peakto Valley, PV)与波前均方根值(Root Mean Square, RMS)均小于传统模糊控制校正后的波面, 波前残差的均方根值也更小。控制器性能实验的结果表明, 变论域模糊控制较传统模糊控制鲁棒性更高、响应时间更短, 最终实现增强系统校正的适应能力、提高校正效率与准确度的目的。

2 变论域模糊控制模型及校正原理

波前校正的变论域模糊控制模型如图1所示。在H-S传感器探测质心斜率 Z_0 的过程中引入波前畸变 R_n , Y_A^{-1} 为H-S传感器延时, Y_B^{-1} 为控制计算延时^[9], Z_n 为输出波前斜率, $\Delta\phi$ 为实时重构出的波前, V_n 为经过变论域模糊控制运算后的变形镜控制电压。变论域模糊控制器结构中由模糊输入变量的伸缩因子 $\alpha(e)$ 、 $\alpha(ec)$ 调整量化因子 k_e 、 k_{ec} , 模糊输出变量的伸缩因子 $\gamma(k)$ 调整比例因子 L_{K_p} 、 L_{K_i} 、 L_{K_d} , 最终实现对输入、输出论域的可变调控。

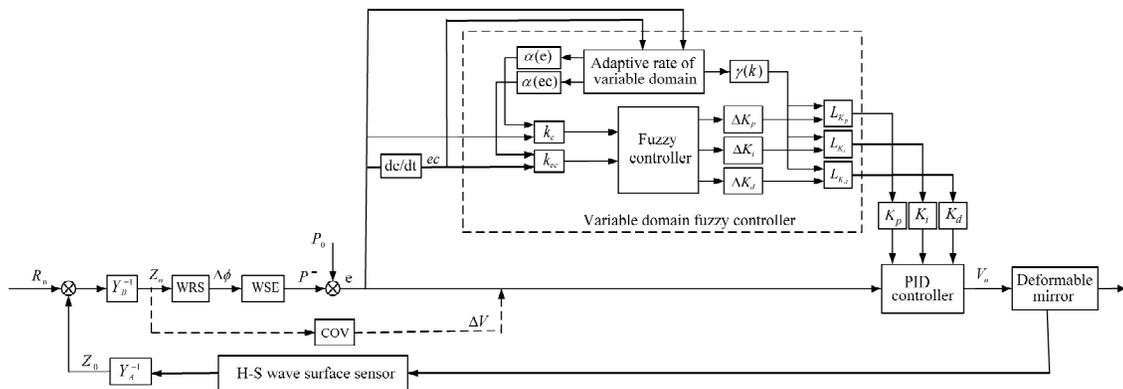


图1 波前校正的变论域模糊控制模型

Fig. 1 Variable domain fuzzy control model with wavefront correction

2.1 波面评价指标的提取

WRS为波前重构过程, 设波前重构矩阵为A, WRS计算过程如公式(1)所示:

$$\Delta\phi = AZ_n \tag{1}$$

WSE为波面评价过程, 波面评价过程主要是从实时重构出的波前 $\Delta\phi$ 中提取波面评价指标P, 对应

变形镜单个驱动器采集重构波面的深度信息^[5]。COV 为 PID 控制时的电压解算过程,传统 PID 控制跳过 WRS 和 WSE,直接由 Z_n 通过 COV 解出电压残差 ΔV 输入到 PID 控制器。电压残差 ΔV 可表示为:

$$\Delta V = BAZ_n = B\Delta\phi = CZ_n \quad (2)$$

式中, B 即为变形镜的响应模型矩阵。可以看出,传统 PID 控制严格依赖矩阵 B ,而矩阵 B 的标定又容易受到变形镜温度漂移、振动干扰等因素影响,最终对整个校正过程的精确性与快速性产生影响。同时由公式(2)可以发现 $C = BA$,即变形镜各驱动器相对于 H-S 传感器子孔径的相对位置矩阵,会限制实验器材在实际光路调试中的安装位置。而在变论域模糊控制中只需要在波前重构之后确定波面评价指标 $P^{(n)}$,不需要再对矩阵 B 进行标定。

经过校正后,变形镜第 k 次、第 n 个驱动器的输出电压为:

$$v^{(n)}(k) = v_0 + \Delta v^{(n)}(k) \quad (3)$$

式中, $v_0 = [v_0^{(1)}(k), v_0^{(2)}(k), \dots, v_0^{(n)}(k)]$ 为初始电压, $\Delta v^{(n)}(k)$ 为变论域模糊自整定后的输出电压,即

$$\Delta v^{(n)}(k) = k_p^{(n)} \cdot e^{(n)}(k) + k_i^{(n)} \cdot \sum_{k=1}^k e^{(n)}(k) + k_d^{(n)} \cdot [e^{(n)}(k) - e^{(n)}(k-1)] \quad (4)$$

公式(4)中 $e^{(n)}(k)$ 为第 k 次、第 n 个驱动器的波面评价指标 P 的残差参数,所有残差参数记为 $e = [e^{(0)}(k), e^{(1)}(k), \dots, e^{(n)}(k)]^T$ 。

给定波面评价指标 $P = [P^{(0)}(k), P^{(1)}(k), \dots, P^{(n)}(k)]^T$, 给定理想波面的评价指标 $P_0 = [P_0^{(0)}(k), P_0^{(1)}(k), \dots, P_0^{(n)}(k)]^T, P_0^{(0)}(k), P_0^{(1)}(k), \dots, P_0^{(n)}(k) = 0$ 。

即:

$$e^{(n)}(k) = P^{(n)}(k) - P_0^{(n)}(k) = P^{(n)}(k) \quad (5)$$

其 $e^{(n)}(k) - e^{(n)}(k-1)$ 为残差差分参数,所有残差差分参数记为 $ec = [e_c^{(0)}(k), e_c^{(1)}(k), \dots, e_c^{(n)}(k)]^T$ 。将 e 与 ec 作为变论域模糊控制器的输入,将 PID 的 3 个参数 K_p, K_i 和 K_d 作为变论域模糊控制器的输出。每一个驱动器可视作对应一个变论域模糊控制器,最终得到比例参数 $K_p = [k_p^{(0)}, k_p^{(1)}, \dots, k_p^{(n)}]^T$, 积分参数 $K_i = [k_i^{(0)}, k_i^{(1)}, \dots, k_i^{(n)}]^T$, 微分参数 $K_d = [k_d^{(0)}, k_d^{(1)}, \dots, k_d^{(n)}]^T$ 。

2.2 模糊论域及规则库的设计

首先确定论域的选取范围,包含输入论域 $\{e\}$ 和 $\{ec\}$ 以及输出论域 $\{K_p\}, \{K_i\}$ 和 $\{K_d\}$, 符号 $\{\cdot\}$ 表示集合。输入论域的选取参考波面评价指标 P 的范围,设定 $\{e\}$ 和 $\{ec\}$ 在模糊集合上的范围分别为 $[-120, 120]$ 和 $[-6, 6]$ 。对于输出论域的选取,当隶属度为正负对称时 K_p, K_i 和 K_d 通常需要设定初始值,而隶属度为正分布时则不需要设定初始值^[10],因此设定 $\{K_p\}, \{K_i\}$ 和 $\{K_d\}$ 在模糊集合上的范围均为 $[0, 11]$ 。其次将模糊集合的范围划分为 7 个模糊子集,即负大(NB)、负中(NM)、负小(NS)、零(ZO)、正小(PS)、正中(PM)和正大(PB)^[11]。模糊控制规则的设计要求如下:误差较大时,控制参数倾向于快速减小误差的效用;误差较小时,控制参数在消除误差的同时,还需要尽量避免系统振荡、减小超调^[12]。根据系统在受控过程中对应不同范围的 e 和 ec ,建立合适的关于 K_p, K_i, K_d 的模糊逻辑语句:

- 1) If(e is NB) and(ec is NB) then(K_p is PB) (K_i is NB) (K_d is PS)
- 2) If(e is NB) and(ec is NM) then(K_p is PB) (K_i is NB) (K_d is NS)
- 3) If(e is NB) and(ec is NS) then(K_p is PM) (K_i is NM) (K_d is NB)
-
- 4) If(e is PB) and(ec is PB) then(K_p is NB) (K_i is PB) (K_d is PB)

最后选取高斯型(Gaussmf)函数构造如表 1、表 2、表 3 所示隶属度分布的模糊规则表。

表 1 K_p 的模糊规则表
Tab. 1 Fuzzy rule table of K_p

E	EC						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

表 2 K_i 的模糊规则表
Tab.2 Fuzzy rule table of K_i

E	EC						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	ZO
NS	NB	PM	NS	NS	ZO	PS	PS
ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
PM	ZO	ZO	PS	PS	PM	PB	PB
PB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB

表 3 K_d 的模糊规则表
Tab.3 Fuzzy rule table of K_d

E	EC						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	ZO
NS	ZO	NS	NM	NM	NS	NS	ZO
ZO	ZO	NS	NS	NS	NS	NS	ZO
PS	ZO						
PM	PB	NS	PS	PS	PS	PS	PB
PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

2.3 变论域模糊控制算法的设计

变论域模糊算法实质上是在已有规则的模糊控制器的基础上合理添加变论域调节因子,原本的论域范围就会随着误差的变化而实时更新,进而将模糊规则库转变为更加灵活的自适应规则库。输入变量为 e ,通过伸缩因子 $\alpha(e)$ ($\alpha \in [0,1]$) 将初始论域 $[-\alpha E, \alpha E]$ 变换为 $[-\alpha(e')E, \alpha(e')E]$,如图 2 所示,无论当论域膨胀还是压缩,都相当于对控制规则进行实施调控,从而提高了控制系统的动态性能,最终达到提升控制精度的效果。

变论域调节因子使用函数法^[13]来确定,模糊输入变量的伸缩因子的算式为:

$$\alpha(e) = \left(\frac{|e|}{E}\right)^{\tau_1} \alpha(ec) = \left(\frac{|ec|}{EC}\right)^{\tau_2} \quad (6)$$

其中, $e \in [-E, E] \in [-120, 120], ec \in [-EC, EC] \in [-6, 6], \tau$ 称为伸缩因子系数, $0 < \tau_1 < 1, 0 < \tau_2 < 1$ 。将和 e 和 ec 分别用 α, β 表示,

采用下述公式计算 $\tau(x)$ 的值:

$$\tau(x) = 1 - \zeta e^{-kx^2} \quad (7)$$

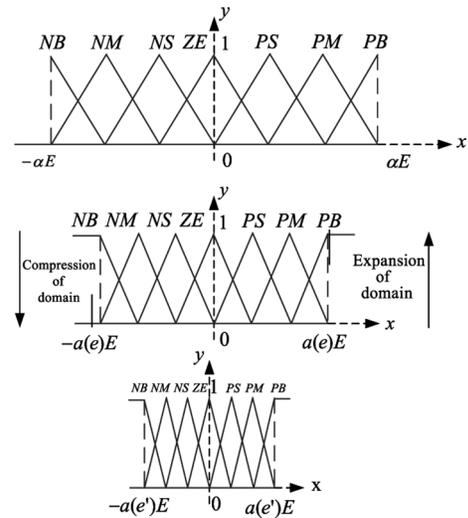


图 2 可变论域模糊控制规则变化图
Fig.2 Variable theory domain fuzzy control rule change diagram

则:

$$\tau(\alpha) = 1 - \zeta e^{-k\alpha^2} \quad (8)$$

$$\tau(\beta) = 1 - \zeta e^{-k\beta^2} \quad (9)$$

其中, k 称为控制系统灵敏度系数, $k > 0$ 。在合理的范围内 k 值越大,论域伸缩的响应速度越快,系统的灵敏度也就越高。 ζ 称为论域最小取值系数, $0 < \zeta < 1$ 。取 $k = 10, \zeta = 0.1$ 。

模糊输出变量的伸缩因子的算式为:

$$\gamma(k) = QT \sum_{k=1}^n [P_1 e(k) + P_2 ec(k) + \gamma(0)] \quad (10)$$

式中, Q 为比例常数; T 为采样周期; P 为常数向量; $\gamma(0)$ 为初始值。取 $Q = 100, T = 0.001, P = [1, 1]^T, \gamma(0) = 1$ 。

量化因子 k_e, k_{ec} 和比例因子 $L_{K_p}, L_{K_i}, L_{K_d}$ 的求解按照实际控制系统运行的动态范围, $[e_{\min}, e_{\max}]$, $[ec_{\min}, ec_{\max}]$, $[\Delta k_{\min(m)}, \Delta k_{\max(m)}]$ ($m = p, i, d$), 使用论域正规化^[13]变换公式:

$$\begin{cases} e = k_e \left(e - \frac{e_{\max} - e_{\min}}{2} \right) \\ k_e = \frac{2}{e_{\max} - e_{\min}} \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} ec = k_{ec} \left(ec - \frac{ec_{\max} - ec_{\min}}{2} \right) \\ k_{ec} = \frac{2}{ec_{\max} - ec_{\min}} \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} \Delta k_{(m)} = \left(\Delta k_{(m)} - \frac{\Delta k_{\max(m)} - \Delta k_{\min(m)}}{2} \right) / L_{K(m)} \\ L_{K(m)} = \frac{\Delta k_{\max(m)} - \Delta k_{\min(m)}}{2} \end{cases} \quad (13)$$

2.4 清晰化处理

清晰化过程就是反模糊化的过程,使用重心法^[14]可以达到使输出更加平滑的目的。若 ΔK_p 、 ΔK_i 和 ΔK_d 为经过参数整定后的输出量,则 K_p 、 K_i 和 K_d 的最终取值为:

$$\begin{cases} K_p = k_{p0} + \{e, ec\}K_p = k_{p0} + \Delta K_p \\ K_i = k_{i0} + \{e, ec\}K_i = k_{i0} + \Delta K_i \\ K_d = k_{d0} + \{e, ec\}K_d = k_{d0} + \Delta K_d \end{cases} \quad (14)$$

式中, k_{p0} 、 k_{i0} 、 k_{d0} 为 PID 的初始值,均设定为零。在控制过程中,重复上述流程至输出稳定最终实现最优的参数自整定。

3 实验测试与结果分析

3.1 实验设置

波前校正实验中,模拟光源的波长为 $\lambda = 589 \text{ nm}$,波前畸变由前 20 阶 Zernike 多项式表示。H-S 传感器孔径面阵为 120×120 ,变形镜驱动器数为 49。为保证系统的鲁棒性并提升系统响应的快速性,在波前校正实验的基础上,附加了系统性能对比实验。

3.2 实验结果对比

图 3 为两种模糊控制算法下波前校正的完整过程。模糊控制与变论域模糊控制校正后重构的波面分别为图 3(d)与图 3(f),波面峰谷值 D_{PV} 和均方根值 W_{RMS} 分别从 4.510λ , 0.685λ 到 1.684λ , 0.232λ 。图 4 波前复原误差的标准差 M_{STD} 由 $0.206 \mu\text{m}$ 降至 $0.09 \mu\text{m}$ 。

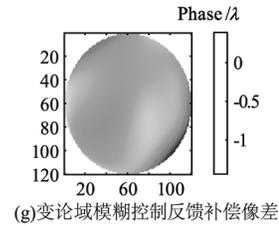
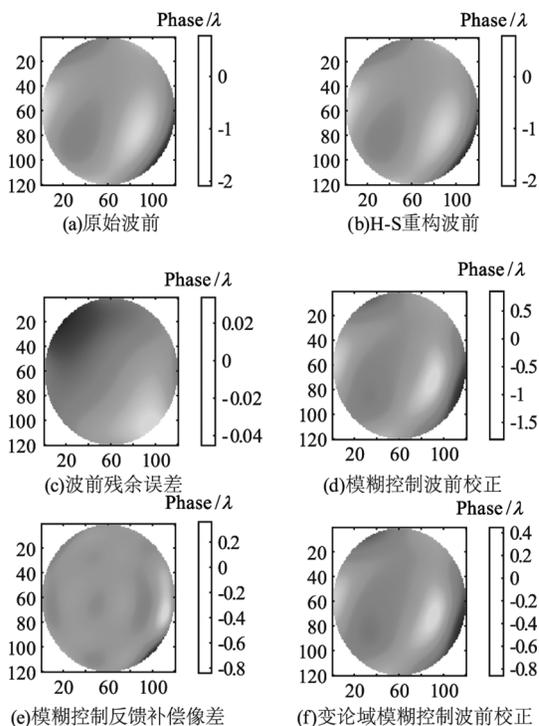
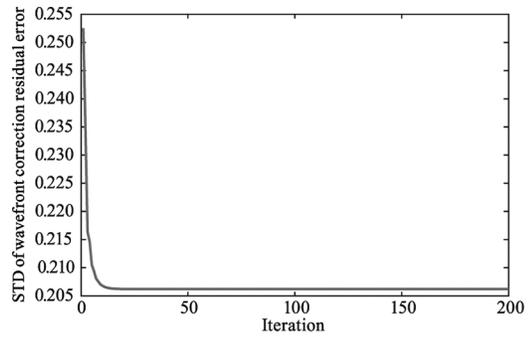
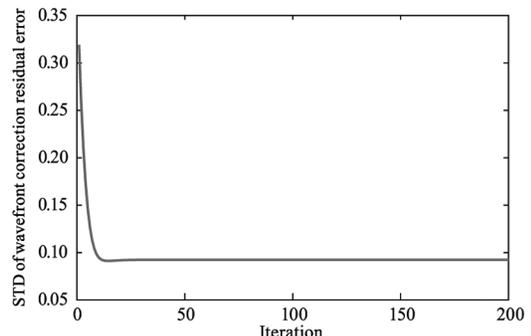


图 3 两种算法的波前校正结果

Fig. 3 The wavefront correction results of two algorithms



(a)模糊控制标准差



(b)变论域模糊控制标准差

图 4 两种算法波前校正残余误差的标准差

Fig. 4 The standard deviation of wavefront correction

residual error of two algorithms

表 4 波前校正结果评价指标

Tab. 4 Wavefront correction result evaluation index

The wavefront correction results	D_{PV}/W_{RMS}
Original wavefront	$4.868\lambda/0.675\lambda$
Wavefront reconstructed by H-S	$4.921\lambda/0.670\lambda$
Residual wavefront error	$0.134\lambda/0.031\lambda$
Fuzzy control wavefront correction	$4.510\lambda/0.685\lambda$
Feedback compensates for aberration of fuzzy control	$2.037\lambda/0.157\lambda$
Variable domain fuzzy control wavefront correction	$1.684\lambda/0.232\lambda$
Feedback compensates for aberration of variable domain fuzzy control	$3.712\lambda/0.455\lambda$

采用频域分析的方法是证明系统性能的有效方法^[15]。通过 Simulink 搭建模糊控制与变论域模糊控制对比仿真实验模型,验证系统对输入信号的跟踪性能,如图 5 所示。输入采样时间为 0.01 s ,幅值为 1 rad 的阶跃信号。模糊控制和变论域模糊控制的阶跃响应曲线如图 6 所示。两条曲线的稳态误差

均为0,通过表5中超调量、上升时间、调节时间和振荡次数四个性能指标对比分析,模糊控制超调量

大,振动次数多,调节时间长,充分证明变论域模糊控制具有良好的稳态性能与快速的响应性能。

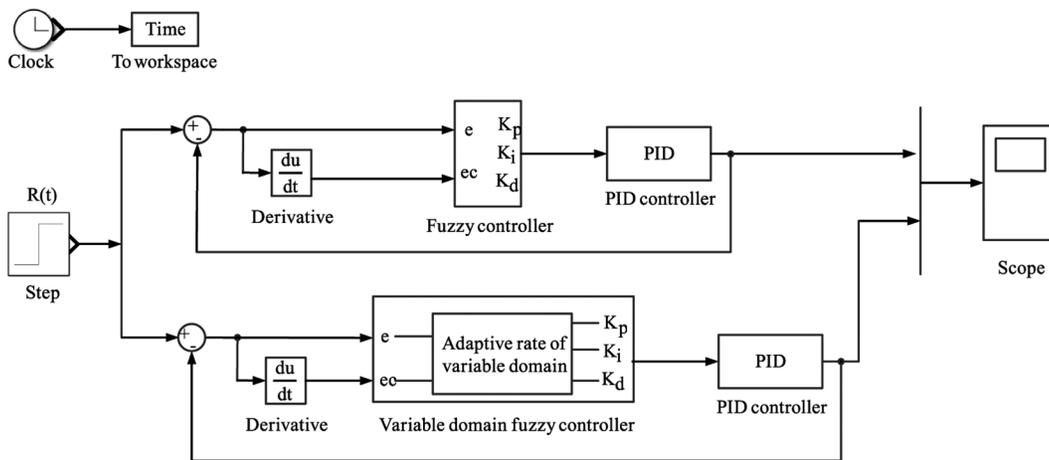


图5 控制系统对比仿真实验模型

Fig.5 A comparative simulation model of control system

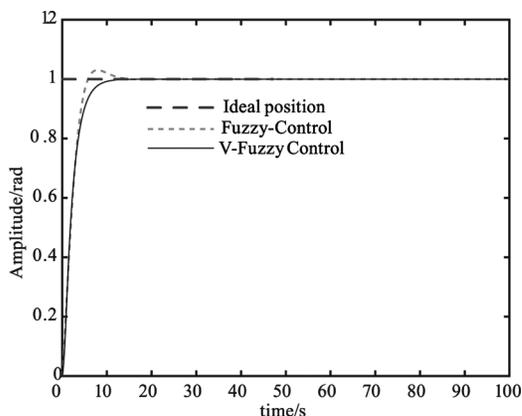


图6 输出的阶跃响应曲线

Fig.6 Step response curve of the output

表5 两种控制器的性能对比

Tab.5 Performance comparison of two controllers

Controller	Performance index			
	Overshoot/%	Raising time/s	Settling time/s	Number of oscillation
Fuzzy	4.3	5.906	14.714	2
Variable domain fuzzy	0	10.328	10.328	0

4 结论

波前校正的变论域模糊控制方法无需标定变形镜的响应矩阵,降低了光路对准调试的难度。借助变论域的自整定特性,校正后的波面峰谷值和均方根值大约为常规模糊控制的50%,可以更好地实现波前复原。变论域模糊控制器相比于常规模糊控制器,超调量几乎为零,系统调节时间提前了大约33%。变论域模糊控制方法在保证系统具有更高

的鲁棒性,提升系统的快速性的同时,利用参数自整定的特性克服了扰动因素对变形镜响应模型造成的不利影响,增强系统校正的适应能力,缩短了系统的响应时间,提高了校正效率与准确度,对于波前校正更具有实用性。目前已经通过仿真证明波前校正的变论域模糊控制方法具有优势,下一步工作需要利用仪器设备继续进行算法的优化。

参考文献:

[1] Wang Yukun. Research on the control of adaptive optical system for space laser communication [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2019. (in Chinese)
 王玉坤. 空间激光通信自适应光学系统的控制研究 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2019.

[2] Wang Jing, Chen Bo, Wang Shuai, et al. The neural network control method of adaptive optics without wavefront sensing [J]. Laser Journal, 2021, 42(2): 102 - 105. (in Chinese)
 王静, 陈波, 王帅, 等. 无波前传感自适应光学神经网络控制方法 [J]. 激光杂志, 2021, 42(2): 102 - 105.

[3] Shao Jian, Li Qi, Feng Chuhuan, et al. Discussion on the development of MEMS deformable mirror technology [J]. Taiwan Strait Technology and Industry, 2018, 30(6): 14 - 20. (in Chinese)
 邵健, 李琦, 冯楚桓, 等. MEMS 变形镜技术发展探讨 [J]. 海峡科技与产业, 2018, 30(6): 14 - 20.

- [4] Toporovsky V V, Kudryashov A V, Samarkin V V, et al. Cooled stacked-actuator deformable mirror for compensation for phase fluctuations in a turbulent atmosphere[J]. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2020, 33(6): 584 – 590.
- [5] Liu Zhangwen, Zhou Zhiqiang, Li Zhengdong. Wavefront correction technology based on fuzzy control[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(3): 68 – 75. (in Chinese)
刘章文, 周志强, 李正东. 基于模糊控制的波前校正技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(3): 68 – 75.
- [6] Liu Zhangwen, Li Zhengdong, Zhou Zhiqiang. Adaptive optics correction technique based on fuzzy control[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(1): 014206. (in Chinese)
刘章文, 李正东, 周志强. 基于模糊控制的自适应光学校正技术[J]. *物理学报*, 2016, 65(1): 014206.
- [7] Zhang Danyu. Adaptive optics wavefront distortion control and experimental research[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020. (in Chinese)
张丹玉. 自适应光学波前畸变控制及实验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2020.
- [8] Cheng Shuang. Research on correction technology of large-scale distorted wavefront in free space coherent optical communication[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2021. (in Chinese)
程爽. 自由空间相干光通信大幅度畸变波前的校正技术研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2021.
- [9] Tesch J, Troung T, Burruss R. On-sky demonstration of optimal control for adaptive optics at Palomar observatory [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(7): 1575 – 1578.
- [10] Zhao Jiting, Jin Gangshi, Gao Xuhui. Fuzzy adaptive PID control algorithm based on fast steering mirror[J]. *Laser & Infrared*, 2018, 48(6): 756 – 761. (in Chinese)
赵继庭, 金刚石, 高旭辉. 基于快速反射镜的模糊自适应 PID 控制算法研究[J]. *激光与红外*, 2018, 48(6): 756 – 761.
- [11] Kluk D J, Boulet M T, Trumper D L. A high-bandwidth, high-precision, two-axis steering mirror with moving iron actuator[J]. *Mechatronics*, 2012, 22: 257 – 270.
- [12] Liu Shuhua, Lu Yaxiong, Luo Tong, et al. A study of digital control for fast steering mirror in space optical communication[J]. *Laser & Infrared*, 2002, 32(3): 165 – 167. (in Chinese)
刘淑华, 卢亚雄, 罗彤, 等. 空间光通信中快速倾斜镜的数字控制研究[J]. *激光与红外*, 2002, 32(3): 165 – 167.
- [13] Qiao Mingrui. Research on galvanometer control technology base on variable universe fuzzy PID [D]. Xi'an: University of Chinese Academy of Science; Xi'an Institute of Optics & Precision Mechanics, Chinese Academy of Science, 2016. (in Chinese)
乔明蕊. 基于可变论域模糊 PID 的振镜控制技术研究[D]. 西安: 中国科学院大学, 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2016.
- [14] Zuo Shuai, He Ting, Yao Siyuan. Temperature control system for semiconductor laser based on fuzzy PID[J]. *Laser & Infrared*, 2014, 44(1): 94 – 97.