

基于模糊控制的自适应光学校正技术

刘章文 李正东 周志强 袁学文

Adaptive optics correction technique based on fuzzy control

Liu Zhang-Wen Li Zheng-Dong Zhou Zhi-Qiang Yuan Xue-Wen

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 014206 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.014206

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.014206>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I1>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

Nd:LuYAG 混晶 1123 nm 被动调 Q 激光器

A diode pumped passively Q-switched Nd:LuYAG laser emitting at 1123 nm

物理学报.2015, 64(17): 174203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.174203>

部分相干双曲余弦厄米高斯光束在非 Kolmogorov 大气湍流中的传输特性

Propagation properties of partially coherent Hermite-cosh-Gaussian beams in non-Kolmogorov turbulence

物理学报.2015, 64(3): 034208 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.034208>

激光二极管双端直接抽运混合腔板条激光器

Laser diode double-end-direct-pumped slab laser with hybrid resonator

物理学报.2015, 64(1): 014203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.014203>

激光二极管抽运的高重频高平均功率 Nd:YAG 激光器

Laser diode pumped Nd:YAG laser with high repetition and high average power

物理学报.2014, 63(22): 224204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.224204>

激光脉冲前后沿相干叠加对多程放大的影响

Effect of laser coherent superposition in multi-pass amplification process

物理学报.2014, 63(18): 184205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.184205>

基于模糊控制的自适应光学校正技术*

刘章文[†] 李正东 周志强 袁学文

(中国工程物理研究院应用电子学研究所, 高能激光科学与技术重点实验室, 绵阳 621900)

(2015年8月20日收到; 2015年9月13日收到修改稿)

自适应光学中普遍采用的比例-积分-微分(PID)控制严格依赖于变形镜的响应模型, 响应模型的标定非常繁琐且性能容易随时间和温度而漂移. 采用模糊控制摆脱了对变形镜响应模型的依赖, 通过波面的快速重构, 从波面中提取波面评价指标, 将该评价指标及其微分作为模糊PID控制器的输入. 选择模糊输入和输出论域的隶属度函数, 设计出模糊规则库, 通过模糊推理、解模糊等过程, 对PID控制器的3个参数即比例 k_p 、积分 k_i 和微分 k_d 进行模糊自整定, 实现了自适应控制. 采用高速数字信号处理器(DSP)设计了硬件验证测试平台, 通过该平台的测试, 证明该方法有效可行, 在不需要变形镜响应矩阵的前提下, 能够将光斑的衍射极限倍增因子 β 值从10—12校正到3—4, 与传统的PID控制基本一致, 但稳定性更好. 因无需标定, 故降低了变形镜的安装要求.

关键词: 自适应光学, 模糊控制, 波前校正, 变形镜

PACS: 42.55.-f, 95.75.Qr, 07.05.Dz, 07.05.Mh

DOI: 10.7498/aps.65.014206

1 引言

自适应光学系统是通过校正波面来控制光束质量. 在校正方法中, 虽然无波前传感器的校正方法是现在的研究热点^[1-3], 但这些方法每次校正输出时间较长, 精度有待验证, 目前还不宜用在实时性高的系统中. 高速实时校正系统用得最普遍的方法仍然是基于Hartmann-Shack (H-S)波面传感器的控制校正系统^[4-8]. 在这些方法中, 有的直接使用比例-积分-微分(PID)控制加相应算法^[4,5]获得了很好的实用效果. 文献^[6]利用开环波前来预测大气湍流, 文献^[7]用两个波前传感器来校正频率带宽达50 Hz的波前残差, 文献^[8]采用了修正算法来修正有效带宽.

在这些实时校正系统中, PID控制器被广泛采用. 然而, 传统的PID控制严格依赖变形镜的响应模型, 需要标定变形镜的响应矩阵^[9], 而变形镜镜面的响应是一个典型的多输入多输出(MIMO)系

统, 标定过程十分繁琐. 更关键的是, 变形镜本身的性能因环境变化或强光照射容易产生漂移, 在某一刻标定的模型在另一时段未必是准确的. 在这种情况下, 如果没有非常优秀的自适应匹配算法对PID参数进行自整定的话, 系统的稳定性将大受影响. 为了摆脱对变形镜模型的依赖, 引入模糊控制^[10,11]方法, 将模糊控制与PID相结合, 对变形镜的每一个驱动器加入一个独立的PID控制器, 使用模糊推理对每个PID的3个参数即比例系数、积分系数和微分系数进行调节, 实现模糊自适应整定. 新方法无需变形镜的响应模型, 因此省去了对其响应矩阵的标定, 但需要快速波面重构算法^[12]. 由于变形镜模型标定后对其在光路上的装配位置进行了限制, 因此加入模糊控制后增加了系统校正的适应能力, 降低了系统光路安装调试难度和提高校正效率.

新方法在一个以高速DSP C6455为处理器, 以H-S波前传感器及变形镜组成的光路系统的平台上进行了测试. 结果显示, 在不需要变形镜响应

* 国家高技术研究发展计划(批准号: 2015AA8022006)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: 625692083@qq.com

矩阵的前提下, 能够将光斑的衍射极限倍增因子 β 值^[13] 从10—12校正到3—4, 与传统的PID控制基本一致, 但稳定性更好.

2 模糊控制模型及传统PID的限制

模糊PID控制模型示于图1. 在该图中, 从H-S传感器探测到的质心斜率 S_0 会加入各种扰动, 参数 G_r 为大气湍流扰动, G_n 为探测噪声, S_n 为输出波前斜率, $\Delta\Phi$ 是实时重构出的波前, V_n 为经过模糊PID运算后的变形镜控制电压矢量, Z_A^{-1} 和 Z_B^{-1} 分别为系统的H-S探测器延时和控制计算延时(文中系统总延迟为两个采样周期)^[5]. 图1中, SWC为波面重构环节, SWE为波面评价环节, 该环节主要是在波前 $\Delta\Phi$ 中提取波面评价指标矢量 $J = [j^{(0)}, j^{(1)}, \dots]$ (上标加括号为通道编号, 后面与此同), 元素 $j^{(n)}$ 对应着 n 号驱动器的评价指标, 它反映了该驱动器相对于理想波面的深度信息. 给定理想0平面的评价指标矢量 J_0 , 评价指标 J 与 J_0 之差得到矢量 E , 将 E 作为PID控制器的输入, 同时对 E 进行差分获得矢量 EC , 将 E 和 EC 作为模糊控制器的决策输入, 模糊控制器的输出为PID的3个比例参数 K_P , K_I 和 K_D , 此即为模糊PID控制的数学模型. 每一个驱动器对应一个模糊PID控制器(图1只示出一个驱动器模型, 大写字母表示多个驱动器的矢量), 因此, 所有驱动器形成如下参数矢量: 误差 $E = [e^{(0)}, e^{(1)}, \dots]$, 误差差分 $EC = [ec^{(0)}, ec^{(1)}, \dots]$, 比例 $K_P = [k_p^{(0)}, k_p^{(1)}, \dots]$, 积分 $K_I = [k_i^{(0)}, k_i^{(1)}, \dots]$, 微分 $K_D = [k_d^{(0)}, k_d^{(1)}, \dots]$. E 和 EC 的取值范围即构成模糊控制器的输入论域 $\{E\}$ 和 $\{EC\}$, K_P , K_I 和 K_D 的范围构成模糊

控制器的输出论域 $\{K_P\}$, $\{K_I\}$ 和 $\{K_D\}$, 符号 $\{\cdot\}$ 表示集合.

图1中虚线框SWV为常规PID控制时的电压解算环节. 常规PID控制没有波面评价环节SWE, 而是直接由 S_n 通过电压解算环节SWV解出电压残差 ΔV 并输入到PID控制器, 见图1的虚线框. 在图1中, 若略去大气湍流扰动 G_r 和探测噪声 G_n , 设波面重构矩阵为 A , 则通过H-S传感器输出的质心坐标计算得到倾斜率 S_n 后, 波面重构SWC计算过程为

$$\Delta\Phi = AS_n. \quad (1)$$

若变形镜从波面到电压的响应矩阵为 B , 则电压解算SWV计算过程为

$$\Delta V = B\Delta\Phi = BAS_n = CS_n. \quad (2)$$

正如前面提到的, 传统PID在实时校正中不必进行波面重构, 而是将(2)式中的 $BA = C$ 计算一次并保存, 实时解算 CS_n 即可. 波面重构矩阵 A 只与H-S传感器有关, 通过传感器的结构很容易获得. 从(1)和(2)式可以看出, 传统PID的输入严格依赖变形镜的响应矩阵 B , 由于矩阵运算需要大量的内存空间, 对于嵌入式硬件系统来说, 这是不小的开销, 且矩阵 B 需通过对变形镜的精确标定来确定, 标定过程比较麻烦, 更关键的是标定之后对变形镜在光路系统中的安装位置也要进行严格的限制, 比如各驱动器对H-S传感器孔径的相对位置, 增加了光路调试安装的难度. 而在模糊控制模型中, 波面重构后直接从波面中提取评价指标 J , 不存在标定 B 矩阵问题, 只要保证有效光斑在驱动器的有效范围之内即可, 所以在该模型中, 评价指标的提取是关键的一环.

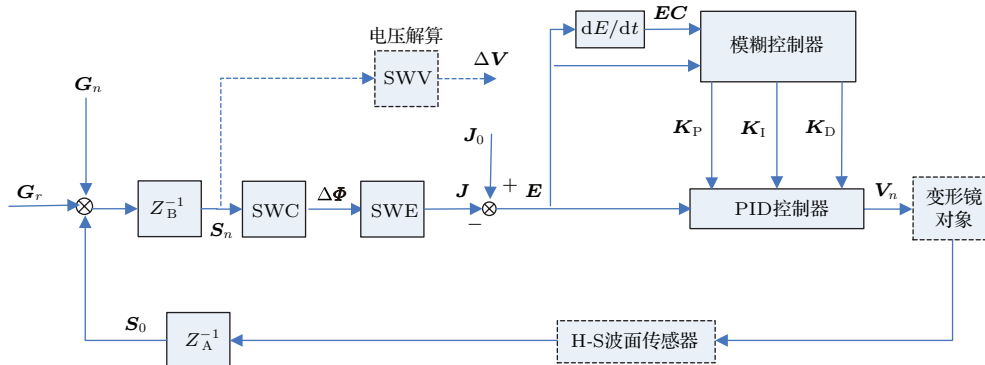


图1 自适应光学系统模糊PID控制数学模型

Fig. 1. Fuzzy PID controlling mathematical model for adaptive optics system.

3 模糊控制实现原理

从图1的模型可以看出, 要实现光束的模糊校正, 有几个关键技术点必须解决: 快速波面重构技术, 波面评价指标矢量 \mathbf{J} 的提取以及模糊控制器的设计.

对波面重构, 直接用(1)式的矩阵方式, 重构矩阵 \mathbf{A} 是一个大数据矩阵, 不利于存储和实时计算. 本研究采用一种快速的扫描法^[12]很好地解决了这个问题, 因此本方法的重点就集中在波面评价指标的提取和模糊控制器的设计.

3.1 波面评价指标的提取

波面评价指标是指驱动器对应波面的综合深度信息, 根据(2)式, 它与校正电压存在线性映射关系. 对波面 $\Delta\Phi$ 评价指标 \mathbf{J} 的提取, 首先需要确定变形镜各驱动器对应波面的实际坐标位置, 以子孔径数为单位, 通过输出已知电压对波面的响应很容易获得该坐标. 由于波面的深度信息反映了评价矢量 \mathbf{J} , 矢量的各元素 $j^{(n)}$ 的提取描述为: 以驱动器在波面网格中的坐标为中心, 以一个指定的矩形区域(比如图2中的 5×5 模板)为计算范围, 计算波面加权深度之和的平均作为评价参数. 之所以加权, 主要考虑对应驱动器对波面不同位置的贡献不一致(即耦合因素). 图2所示的加权模板的 $j^{(n)}$ 的计算式为(当前孔径位置权系数 α 永远为1)

$$j^{(n)} = \frac{\sum_i \sum_j \Delta\Phi_{i,j} \alpha_{i,j}}{\sum_i \sum_j \alpha_{i,j}}. \quad (3)$$

0.712	0.839	0.877	0.814	0.767
0.812	0.955	0.985	0.917	0.810
0.819	0.960	1.0	0.927	0.820
0.803	0.952	0.985	0.920	0.804
0.786	0.800	0.808	0.803	0.732

图2 一个 5×5 加权模板

Fig. 2. A weighing template of 5-by-5-dimension array.

评价矢量 \mathbf{J} 是向零逼近寻优的, 即 \mathbf{J} 的绝对值越接近零, 光束质量越好, 显然, 理想波面指标矢量 $\mathbf{J}_0 = 0$, $\mathbf{E} = \mathbf{J}_0 - \mathbf{J} = -\mathbf{J}$. 假设每个通道的PID

控制是相互独立的, 评价函数确定后, 第 n 次第 m 通道的输出电压为

$$v^{(m)}(n) = v_0 + \Delta v^{(m)}(n), \quad (4)$$

式中, v_0 为初始电压, $\Delta v^{(m)}(n)$ 为PID模糊自整定后的输出电压, 即

$$\Delta v^{(m)}(n) = \lambda k_p^{(m)} e^{(m)}(n) + \lambda k_i^{(m)} \sum_{k=1}^n e^{(m)}(k) + \lambda k_d^{(m)} (e^{(m)}(n) - e^{(m)}(n-1)), \quad (5)$$

其中, λ 为一固定比例系数, $e^{(m)}(n)$ 为第 n 次第 m 通道的波面评价指标 $j^{(m)}(n)$ 相对0波面评价指标 $j_0^{(m)}(n)$ 的残差. 3个被整定的比例系数 \mathbf{K}_P , \mathbf{K}_I 和 \mathbf{K}_D 的取值范围即为模糊推理的输出论域 $\{\mathbf{K}_P\}$, $\{\mathbf{K}_I\}$ 和 $\{\mathbf{K}_D\}$, 后面均以 $\{\mathbf{K}\}$ 来统称, 即 $\{\mathbf{K}\} = \{\mathbf{K}_P, \mathbf{K}_I, \mathbf{K}_D\}$.

(3) 式中的加权系数可现场标定获得, 即通过驱动器输入已知电压, 由H-S传感器测出输出电压前后的反馈波面, 两波面之差即获得该驱动器的响应波面, 该波面类似一个抛物面, 如图3所示. 波面峰值的位置即是驱动器在波面中的坐标位置, 其余孔径波面值与波峰的比值即为(3)式中的 α 值, 见图2的模板值.

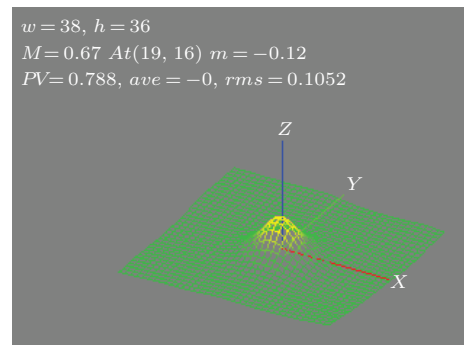


图3 (网刊彩色) 单个驱动器电压输出前后波面差

Fig. 3. (color online) The differential wavefront of single channel output before and after.

3.2 模糊控制器的设计

本模糊控制的主要目的是根据模糊规则动态整定(5)式中的PID系数 $\{\mathbf{K}\} = \{\mathbf{K}_P, \mathbf{K}_I, \mathbf{K}_D\}$, 而隶属度函数的设计和模糊规则库的确定是模糊控制器的关键所在. 在图1的模型中将模糊论域 $\{\mathbf{E}\}$ 和 $\{\mathbf{EC}\}$ 进行模糊化处理, 分别划分为7个模糊子集, 表示为{负大(NB), 负中(NM), 负小(NS), 零(ZO), 正小(PS), 正中(PM), 正大(PB)},

(5) 式中的模糊输出论域 $\{K\}$ 取正分布集合, 各论域表示为

$$\begin{aligned} \{E\} &= \{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}, \\ \{EC\} &= \{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}, \\ \{K\} &= \{ZO, PS, PM, PB\}. \end{aligned}$$

模糊论域 $\{E\}$ 和 $\{EC\}$ 以及 $\{K\}$ 必须确保能覆盖所有模糊子集. 当模糊论域范围确定后, 拟考虑将隶属度函数设计成线性度较好的三角分布, 如图 4 所示. 其中 $\{E\}$ 和 $\{EC\}$ 为正负对称分布, 而 $\{K\}$ 只有正分布.

模糊控制器的关键就是根据模糊推理获得模

糊规则库. 模糊推理主要表现为 if-then 的专家决策系统, 在上面的论域推理过程为

if (E 在集合 x) and (EC 在集合 y) then (K 在集合 z), 且 $x \subseteq \{E\}$, $y \subseteq \{EC\}$, $z \subseteq \{K\}$. 通过该模糊推理, 分别拟定出解算 K_P , K_I 和 K_D 的模糊规则库如表 1、表 2 和表 3 所列. 设论域 $\{E\}$, $\{EC\}$ 和 $\{K\}$ 的隶属度分布分别为 $\mu(E)$, $\mu(EC)$ 和 $\mu(K) = [\mu(K_P), \mu(K_I), \mu(K_D)]$, 表中任何一个规则 (如第 n 个规则), 输入输出论域分别为 $\{E_n\}$, $\{EC_n\}$ 和 $\{K_n\}$, 其推理过程描述如下 ($1 \leq n \leq 49$):

$$H_n = \mu(E_n)^T \wedge \mu(EC_n). \quad (6)$$

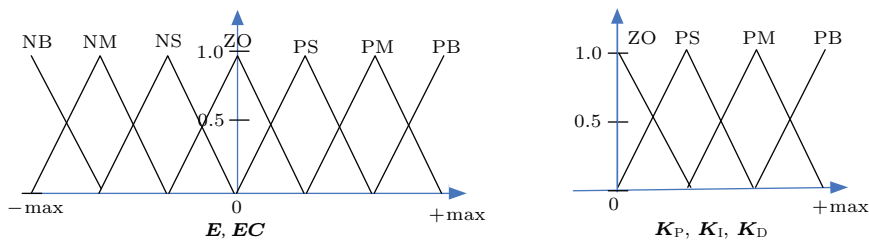


图 4 E , EC , K_P , K_I 和 K_D 的隶属度分布函数

Fig. 4. The membership function of parameters E , EC , K_P , K_I and K_D .

表 1 K_P 的模糊规则表

Table 1. The fuzzy rule table of parameter K_P .

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

表 2 K_I 的模糊规则表

Table 2. The fuzzy rule table of parameter K_I .

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

表 3 K_D 的模糊规则表

Table 3. The fuzzy rule table of parameter K_D .

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

(6) 式中符号“ \wedge ”为取小运算. 将模糊矩阵 H_n 中元素按顺序排列成单列向量即列延拓, 得到 $(H_n)^{(T)}$, 于是规则库解的子集合 R_n 为

$$R_n = (H_n)^{(T)} \wedge \mu(K_n). \quad (7)$$

$\{K\}$ 的所有子集共 49 个, 于是 $\{K\}$ 全部规则集合的解为 R , 即

$$R = R_1 U R_2 U \dots U R_{49}. \quad (8)$$

获得规则库的解后, 若通过 J 已经求得 E 和

EC, 相应的PID 整定参数可得

$$K = (E \times EC)^T \circ R. \quad (9)$$

式中符号“ \circ ”为模糊合成运算. 求得的集合 $\{K\}$ (包括 K_P, K_I, K_D) 是模糊集合, 通过加权平均法解模糊即可获得对应的 $\Delta k_p, \Delta k_i, \Delta k_d$ 的值. 模糊整定后获得对应驱动器本次PID 参数为

$$\begin{cases} k_p = k_{p0} + \Delta k_p, \\ k_i = k_{i0} + \Delta k_i, \\ k_d = k_{d0} + \Delta k_d, \end{cases} \quad (10)$$

其中 k_{p0}, k_{i0}, k_{d0} 为PID 的初始值, 将 k_p, k_i, k_d 代入 (5) 式算出的电压即为当前的最终校正电压.

4 仿真验证测试与结论

在图 1 模型的基础上, 所采用的硬件平台如图 5, 其光路系统实物装置如图 6.

其中光源采用绿光微型激光器 ($\lambda = 532 \text{ nm}$, $P = 100 \text{ mW}$), 激光束通过衰减片、光阑到变形反射镜 DM, 经光学组件后到分光镜, 分光镜将大部分光束直接通过透镜投射到远场光斑测量系统, 用

以测量光束校正前后光斑特性; 小部分光束通过由 H-S 波前传感器、波前预处理器、波前重构及模糊控制器、DM 控制器和上位 PC 组成的校正系统. 波前预处理器 (由高性能的 FPGA 构成), 波前重构及模糊控制器用高速 DSP (TI C6455) 实现, 模糊解算出的电压直接输出到校正执行机构——DM 控制器. H-S 波前传感器孔径面阵为 40×40 , 变形镜驱动器数为 68.

通过测试计算, 系统校正前后重构的波面分别示于图 7 (a) 和图 7 (b), 与此同时, 远场光斑强度分布示于图 7 (c) 和图 7 (d). 校正前后, 波面的 PV 值和 rms 值分别从 $3.708 \mu\text{m}, 0.6258 \mu\text{m}$ 到 $0.673 \mu\text{m}, 0.0972 \mu\text{m}$. 远场光斑质量用衍射极限倍增因子 β 和桶中功率比 BQ 指标来评价 [13], 即 β 为被测实际光束的远场发散角与理想光束的远场发散角之比, β 越小质量越好, 理想光斑时 $\beta = 1$. 校正前后, β 从 10—12 降到 3—4. 桶中功率比定义为规定尺寸内 $BQ = \sqrt{P_{\text{理想}}/P_{\text{实测}}}$, 同样, BQ 越小质量越好, 理想光斑时 $BQ = 1$, 校正前后, BQ 从 4—5 降到 1.3—1.5. 显然, 校正效果非常明显.

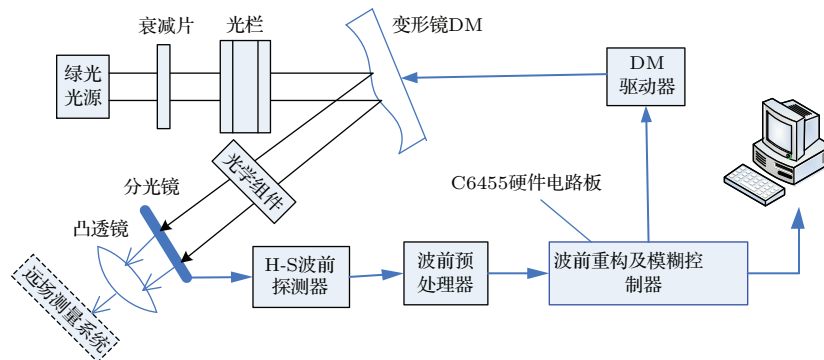


图 5 自适应光学模糊控制硬件测试平台框图

Fig. 5. The fuzzy controlling hardware test platform diagram of adaptive optics system.

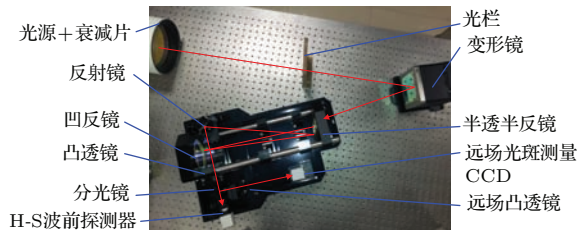


图 6 (网刊彩色) 光路系统装置图

Fig. 6. (color online) Light path system installation.

对图 5 所示系统运用常规 PID 和模糊 PID 两

种方法校正的效果进行了比较, 校正的 H-S 刷新频率都为 100 Hz, 两种方法都使用 β 和 BQ 指标对远场光斑质量进行统计, 统计结果示于图 8. 图 8 显示, 常规 PID 的 β 和 BQ 的平均值分别为 3.5 和 1.44, 模糊 PID 的 β 和 BQ 的平均值分别为 3.43 和 1.39, 指标基本相当. 但计算它们的 rms 值, 常规 PID 分别为 0.63 和 0.35, 模糊 PID 分别为 0.31 和 0.16, 显然模糊 PID 的稳定性较好, 大量的测试统计都支持该结果.

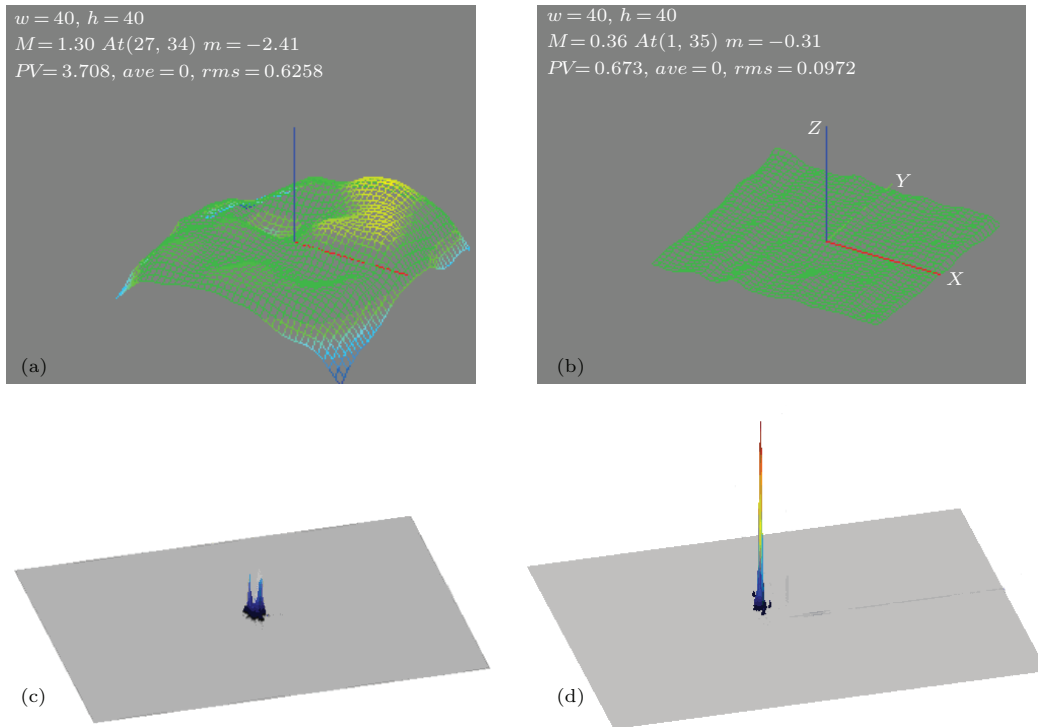


图7 (网刊彩色) 模糊PID校正前后近场波面和远场光斑测试效果图 (a)校正前波前; (b)校正后波前; (c)校正前远场光斑亮度分布; (d)校正后远场光斑亮度分布

Fig. 7. (color online) The wavefront and far-field spot results of fuzzy PID correction before and after: (a) The wavefront before correction; (b) the wavefront after correction; (c) the far-field spot luminance distribution before correction; (d) the far-field spot luminance distribution after correction.

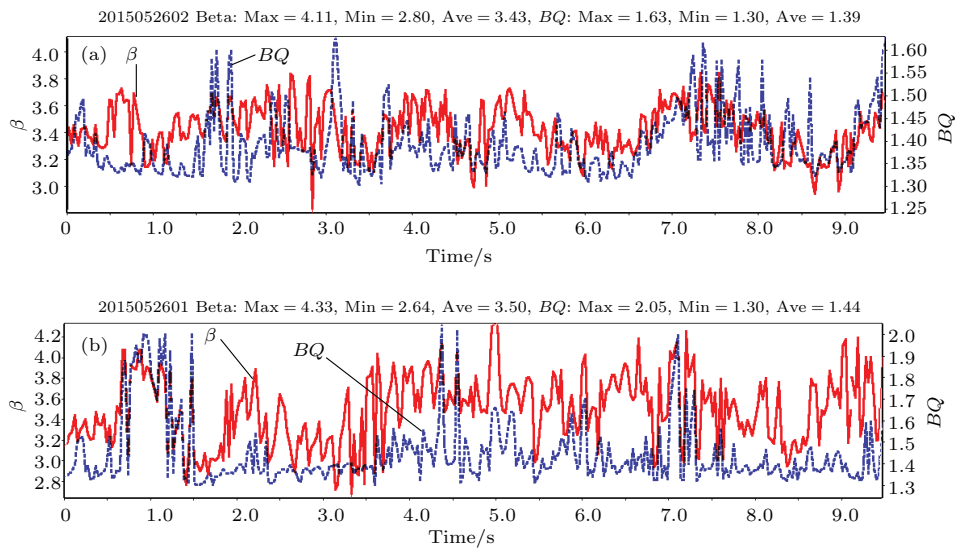


图8 (网刊彩色) 校正光斑质量对比 (β 和 BQ 指标) (a) 模糊PID; (b) 常规PID

Fig. 8. (color online) Correction light spot comparison between fuzzy PID and tradition PID (include parameter β and BQ): (a) The parameter β and BQ for fuzzy PID; (b) the parameter β and BQ for tradition PID.

总体而言, 当常规PID参数调整到某合适的固定值时, 模糊PID的校正效果与之大致相当, 从过程的稳定性看, 模糊PID优于常规PID. 但是, 模糊PID的最大优势在于不用标定变形镜的响应矩阵,

降低了光路调试的对准难度. 正是由于模糊PID对参数的自动整定特性, 使得系统的稳定适应性更强, 所以它是一种真正意义上的智能化的自适应控制方法. 其中的模糊规则库对控制效果起到非常关

键的作用, 而规则库主要来源于平常的经验(即专家决策系统). 本研究采用的规则仅是其中之一, 更适合的规则库还需进一步的摸索, 故本研究还有更大的改进空间.

参考文献

- [1] Facomprez A, Beaurepaire E, Debarre D 2012 *Opt. Express* **20** 2598
- [2] Yang Q Y, Zhao J Y, Wang M H, Jia J L 2015 *Opt. Lett.* **40** 1235
- [3] Yang H Z, Wu J, Gong C L 2014 *Acta Opt. Sin.* **34** 0801002 (in Chinese) [杨慧珍, 吴健, 龚成龙 2014 光学学报 **34** 0801002]
- [4] Zheng Z Y, Li C W, Li B M, Zhang S J 2013 *Chin. Opt. Lett.* **11** 110101
- [5] Yan Z J, Li X Y, Rao C H 2013 *Acta Opt. Sin.* **33** 0301002 (in Chinese) [颜召军, 李新阳, 饶长辉 2013 光学学报 **33** 0301002]
- [6] Tesch J, Truong T, Burruss R, Gibson S 2015 *Opt. Lett.* **40** 1575
- [7] Kudryashov A, Alexandrov A, Rukosuev A, Samarkin V, Galarneau P, Turbide S, Châteauneuf F 2015 *Appl. Opt.* **54** 4352
- [8] Guo Y M, Ma X Y, Rao C H 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 069502 (in Chinese) [郭友明, 马晓燠, 饶长辉 2014 物理学报 **63** 069502]
- [9] Guo Y M, Rao C H, Bao H, Zhang A, Wei K 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 149501 (in Chinese) [郭友明, 饶长辉, 鲍华, 张昂, 魏凯 2014 物理学报 **63** 149501]
- [10] Klug M, Castelan E B, Leite V J S, Silva L F P 2015 *Fuzzy Sets Syst.* **263** 92
- [11] Liu Y J, Tong S C 2015 *Fuzzy Sets Syst.* **263** 49
- [12] Liu Z W, Xie C L, Liu Q H, Yuan X W 2014 *Chin. J. Lasers* **41** 1102007 (in Chinese) [刘章文, 谢川林, 刘七华, 袁学文 2014 中国激光 **41** 1102007]
- [13] Li Z, Zhou J, Xue Y H, He B, Liu C, Qi Y F, Dong J X, Wei Y R, Lou Q H, Pan Z Y 2011 *Chin. J. Lasers* **38** 0402002 (in Chinese) [李震, 周军, 薛宇豪, 何兵, 刘驰, 漆云凤, 董景显, 魏运荣, 楼祺洪, 潘志勇 2011 中国激光 **38** 0402002]

Adaptive optics correction technique based on fuzzy control*

Liu Zhang-Wen[†] Li Zheng-Dong Zhou Zhi-Qiang Yuan Xue-Wen

(Key Laboratory of Science and Technology on High Energy Laser, Institute of Applied Electronic, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

(Received 20 August 2015; revised manuscript received 13 September 2015)

Abstract

In an adaptive optics system, proportion-integration-differentiation (PID) controller is widely used for correcting wave front, but the controller is strictly dependent on the response model of deformable mirror. In this paper, a novel wave front correction method is proposed. The method, combining fuzzy control and PID control, does not depend on the response model of the deformable mirror. Based on rapid wave front reconstruction, the wave front evaluation indexes, extracted from the reconstructed wave front, are employed for the input of fuzzy controller and PID controller. Thus, the model response matrix of deformable mirror is not required. Each actuator of deformable mirror corresponds to an independent fuzzy PID controller. By designing the fuzzy controller, including fuzzy rule base selection and fuzzy reasoning, the three parameters of PID controller, the proportional k_p , the integral k_i and the differential k_d , are adjusted automatically. A high rapid DSP hardware platform is constructed to verify the method. Test results show that the method can be used to correct the diffraction limit multiplication factor β of the light spot from 10–12 to 3–4, which is basically the same as the traditional PID control, but its stability is better. Because the model does not need to calibrate the deformable mirror, the installation of the deformable mirror is easier.

Keywords: adaptive optics, fuzzy controlling, wave front correction, deformable mirror

PACS: 42.55.-f, 95.75.Qr, 07.05.Dz, 07.05.Mh

DOI: 10.7498/aps.65.014206

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2015AA8022006).

[†] Corresponding author. E-mail: 625692083@qq.com