

基于远场指标梯度的自学习波前控制模型

许振兴^{1,2,3,4}, 杨平^{1,3,4*}, 程涛^{1,3,4}, 许冰^{1,3,4}, 李和平²

¹中国科学院光电技术研究所自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209;

²电子科技大学光电科学与工程学院, 四川 成都 610054;

³中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209;

⁴中国科学院大学, 北京 100049

摘要 提出了基于远场指标梯度的自适应光学闭环控制模型, 该模型使用递归最小二乘来稳定响应矩阵, 通过远场指标的梯度信息快速自学习当前的系统状态。结果表明: 该模型具有在线实时更新的特点, 能够自适应 H-S 子孔径缺光或质心探测不理想的状态, 可在一定程度上改善控制性能。

关键词 自适应光学; 递归最小二乘; 波前复原; 远场指标

中图分类号 TP183

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0405001

Self-Learning Wavefront Control Model Based on Far-Field Index Gradient

Xu Zhenxing^{1,2,3,4}, Yang Ping^{1,3,4*}, Cheng Tao^{1,3,4}, Xu Bing^{1,3,4}, Li Heping²

¹Key Laboratory on Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

²School of Optoelectronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China;

³Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

⁴University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In this study, we propose an adaptive optics closed-loop control model based on the far-field index gradient, which can be used to stabilize the response matrix based on the recursive least square values. Further, the current system state can be rapidly self-learned using the far-field index gradient. The experimental results denote that the proposed model exhibits real-time online update characteristics; furthermore, the proposed model can adapt to the state of H-S subaperture lack of light or non-ideal centroid detection, which improves the control performance to some extent.

Key words adaptive optics; recursive least squares; wavefront reconstruction; far-field indicator

OCIS codes 010.1080; 110.1080; 140.3300

1 引 言

哈特曼-夏克(H-S)波前传感器是自适应光学系统中应用最广的波前传感器^[1], 一般由放置在焦平面上的光电探测器和微阵列透镜组成, 通常将 CCD 相机作为光电探测器使用。微透镜阵列可以对入射波前进行子孔径分割, 并将每个子孔径的入射波前聚焦于微透镜的焦平面, 最后通过计算子孔径的波前斜率来复原波前。基于 H-S 波前传感器

的波前复原算法是自适应光学中的关键技术之一, 波前复原的整个计算流程包括质心计算、斜率计算和波前复原三个步骤, 然后通过 PI 控制器即可得到加载至驱动器的总电压。对于波前复原算法, 国内外大量学者进行了广泛研究并提出了很多算法, 主要有模式法、区域法、直接斜率法^[2-5], 其中: 模式法和区域法先是复原出残差波前, 然后通过线性变换就可得到加载到变形镜的控制电压; 直接斜率法则以变形镜驱动器单元的控制电压作为波前复原的计

收稿日期: 2019-10-16; 修回日期: 2019-10-28; 录用日期: 2019-11-28

基金项目: 国家自然科学基金(61805251, 61875203)、中国科学院青年创新促进会资助项目(2017429)

* E-mail: pingyang2516@163.com

算目标,具有计算量小等特点,已被广泛应用于自适应光学系统中。但是,哈特曼传感器探测到的斜率误差太大^[6],会导致上述三种方法的波前复原性能下降,从而降低了比例-积分(PI)^[7]控制器的校正性能。

随机并行梯度下降法(SPGD)^[8]是一种蒙特卡罗梯度估计方法,具有结构简单、适用于优化多变量的特点,并以随机化、并行化的方式搜索整个解空间,通过优化远场图像的性能指标来得到控制电压,且其控制性能独立于 H-S 传递的误差信息,同时独立于波前复原计算带来的误差信息。由于远场光斑信息求解控制电压是多解问题,故而优化远场图像性能指标的 SPGD 方法具有迭代次数多、收敛速度慢的弊端,难以满足实时性的要求。而基于 H-S 的自适应光学系统,从其斜率数据到控制电压具有唯一解,因此求解速度快,可满足系统实时性的要求,但是控制性能会受到哈特曼传感器斜率误差的影

响。尤其是在缺光或质心探测不理想的情况下,哈特曼子孔径会导致 PI 控制性能下降。针对该问题,本文结合 SPGD 无模型方法,利用远场性能指标变化包含的梯度信息来引导响应矩阵在线更新,从而补偿控制性能。为了使学习模型保持泛化性,本文将递归最小二乘法(RLS)学习到的参数作为正则项来稳定系统运行过程中的响应矩阵。本文模型兼顾了收敛速度、自适应性和收敛精度,可根据系统实际状态自适应哈特曼探测性能的变化,具有自学习能力,可以保证控制性能的稳定。

2 模型构建

2.1 经典方法及分析

图 1 为基于直接斜率法的自适应光学控制系统,可知:输入到 PI 控制器的测量误差主要由空间采样误差、质心测量误差构成,这两项误差通过波前重构矩阵的传递影响 PI 控制器的控制精度。

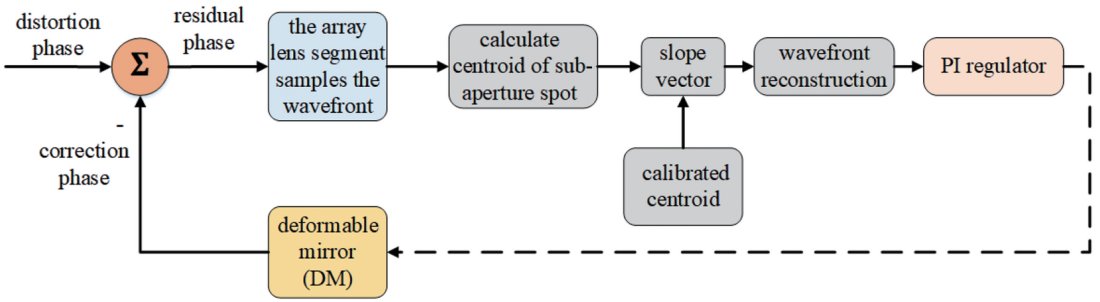


图 1 自适应光学控制系统

Fig. 1 Adaptive optical control loop

图 1 中的波前重构过程可通过直接斜率法实现。首先,依次为变形镜的驱动器单元 j 加载单位电压 U_j ,并计算哈特曼子孔径 i 的质心 (x_i, y_i) ;然后与标定质心 (x_c, y_c) 作差分运算得到单位电压对应的斜率响应 $R_i = (x_i, y_i) - (x_c, y_c)$ 。其中,质心坐标的计算公式^[9]为

$$\begin{cases} x = \frac{\sum_{i,j} x_{i,j} I_{ij}}{\sum_{i,j} I_{ij}} \\ y = \frac{\sum_{i,j} y_{i,j} I_{ij}}{\sum_{i,j} I_{ij}} \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $x_{i,j}$ 为像素位置; $y_{i,j}$ 为像素位置; I_{ij} 为子孔径内坐标 (i, j) 的像素值; n, m 为哈特曼子孔径窗口的大小。依次计算子孔径的斜率响应就可以得到波前斜率响应矩阵 \mathbf{R} ,由于波前残差斜率与驱动电压

之间呈近似线性关系,故

$$\mathbf{G} = \mathbf{R}\mathbf{U} + \mathbf{w}, \quad (2)$$

式中: \mathbf{G} 为 H-S 得到的质心斜率; \mathbf{U} 为驱动变形镜的输入电压; \mathbf{w} 为噪声。由于自适应光学系统的输入为波前残差的斜率,故需要求解(2)式中 \mathbf{R} 的广义逆矩阵,计算 \mathbf{R} 逆矩阵 \mathbf{R}^+ 的方法一般有奇异值分解法、最小二乘法、Gram-Schmidt 正交法三种。其中奇异值分解法不管矩阵 \mathbf{R} 的条件数如何,都可以得到稳定的数值解,并在最小二乘最小范数意义下得到广义逆 \mathbf{R}^+ 。求得广义逆 \mathbf{R}^+ 后,驱动电压与波前斜率向量之间的关系可以表示为

$$\mathbf{U} = \mathbf{R}^+ \mathbf{G} + \mathbf{E}, \quad (3)$$

式中: \mathbf{E} 为重构误差。为了确保系统的控制稳定性,通过(3)式得到的电压不能直接驱动变形镜,但可以利用 PI 控制器得到控制电压。最终施加于变形镜的控制电压 $U(t)$ 的计算公式为

$$U(t) = a \cdot U(t-1) + b \cdot \mathbf{R}^+ [\mathbf{G}(t) + \mathbf{e}(t)] =$$

$$a \cdot \mathbf{U}(t-1) + b \cdot \mathbf{R}^+ \mathbf{G}(t) + \mathbf{E}(t), \quad (4)$$

式中: a 为衰减系数; b 为增益系数; $\mathbf{G}(t)$ 为 t 时刻的斜率真值; $\mathbf{e}(t)$ 为 t 时刻的斜率测量误差; $\mathbf{E}(t)$ 为 t 时刻的波前重构误差。由(4)式可知, 控制电压 $\mathbf{U}(t)$ 受到响应矩阵 \mathbf{R}^+ 和斜率测量误差的影响。在 H-S 探测不理想的情况下, 根据文献[9]可知质心误差引起的波前重构误差的均方根为

$$\sigma_\varphi = \sqrt{\frac{\sigma_c N}{d} \left[\sum_{j=1}^P M(j) \right]}, \quad (5)$$

式中: σ_c 为 H-S 质心探测误差; d 为艾里斑直径(像素); $M(j)$ 与子孔径分布特征、子孔径分割数相关; N 为 H-S 传感器的微透镜阵列数; P 为总的 Zernike 模式阶数。由(5)式可知重构误差来源于 H-S 传感器, 并独立于远场图像的性能指标。因此, 有波前的自适应光学系统的工作稳定性和误差传递与所采用波前传感器的波前复原算法紧密相关。为了补偿重构误差, 使得(4)式逼近远场性能指标最优, 可使用梯度下降法寻优 \mathbf{R}^+ 。首先求远场性能指标 J 对模型参数 \mathbf{R}^+ 的偏导, 即

$$\frac{\partial J}{\partial \mathbf{R}^+} = \frac{\partial J}{\partial \mathbf{U}(t)} \frac{\partial \mathbf{U}(t)}{\partial \mathbf{R}^+} =$$

$$\frac{\partial J}{\partial \mathbf{U}(t)} \frac{\partial \{a \cdot \mathbf{U}(t-1) + b \cdot \mathbf{R}^+ [\mathbf{G}(t) + \mathbf{e}(t)]\}}{\partial \mathbf{R}^+} = b \left[\frac{\partial J}{\partial \mathbf{U}(t)} \mathbf{G}(t) + \frac{\partial J}{\partial \mathbf{U}(t)} \mathbf{e}(t) \right]. \quad (6)$$

根据(6)式可知斜率真值项的梯度 $\frac{\partial J}{\partial \mathbf{U}(t)} \mathbf{G}(t)$ 和斜率误差项的梯度 $\frac{\partial J}{\partial \mathbf{U}(t)} \mathbf{e}(t)$ 均为性能指标 J 的梯度方向, 其中 $\frac{\partial J}{\partial \mathbf{U}(t)}$ 与 H-S 传感器无关, 因此可通过

$\frac{\partial J}{\partial \mathbf{R}^+}$ 来补偿重构误差, 得到当前斜率输入下补偿后的

的响应矩阵 \mathbf{R}^+ 。(6)式中的 $\frac{\partial J}{\partial \mathbf{U}(t)}$ 为待求解项, 可

通过 SPGD 方法求解, 然后利用梯度法引导响应矩阵 \mathbf{R}^+ , 自学习系统状态。通常情况下, 基于 SPGD 的自适应光学控制系统如图 2 所示。

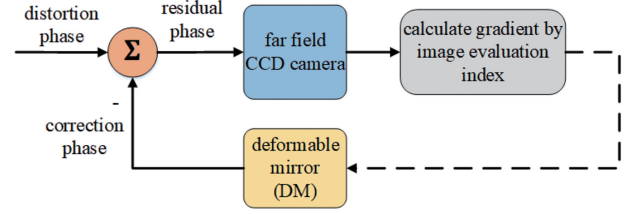


图 2 基于远场性能指标的自适应光学校正系统

Fig. 2 Adaptive optical correction system based on far field metrics

SPGD 是一种无模型的梯度估计方法, 它利用优化性能指标的变化量来估计梯度向量。SPGD 最初来源于神经网络和随机逼近理论, 具有多元振动频率和爬山法^[10]的优点, 但也有容易陷入局部最小的缺点。通过性能指标优化控制电压的方法还有遗传算法^[11]、模拟退火算法^[12]等, 但是这些方法都不具备在线动态控制的特点。而 SPGD 只需要计算扰动电压 $\Delta \mathbf{U}(t)$ 前后的性能指标 J , 就可以得到性能指标 J 对控制电压 \mathbf{U} 的梯度 $\nabla_{\mathbf{U}} J$, 并在线优化控制电压。

由于梯度 $\nabla_{\mathbf{U}} J$ 不受 H-S 探测误差的影响, 且能优化控制性能, 因此可以使用梯度下降法更新被 H-S 探测误差影响的响应矩阵 \mathbf{R}^+ , 对该矩阵进行补偿。由于扰动电压 $\Delta \mathbf{U}(t)$ 使得波前质心斜率产生扰动 $\Delta \mathbf{G}(t)$, 并且 $\Delta \mathbf{G}(t)$ 与当前时刻 t 相关, 且基本满足(3)式, 故可以得到一个对应关系 $(\Delta \mathbf{G}(t), \Delta \mathbf{U}(t))$ 。 $\nabla_{\mathbf{U}} J$ 和 $(\Delta \mathbf{G}(t), \Delta \mathbf{U}(t))$ 计算流程图见图 3。

为了使性能指标 J 对响应矩阵 \mathbf{R}^+ 进行优化, 需要计算 $\nabla_{\mathbf{R}^+} J$ 。根据链式法可得

$$\nabla_{\mathbf{R}^+} J = \frac{\partial J}{\partial \mathbf{U}} \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial \mathbf{R}^+} = \frac{\partial J}{\partial \mathbf{U}} \mathbf{G}. \quad (7)$$

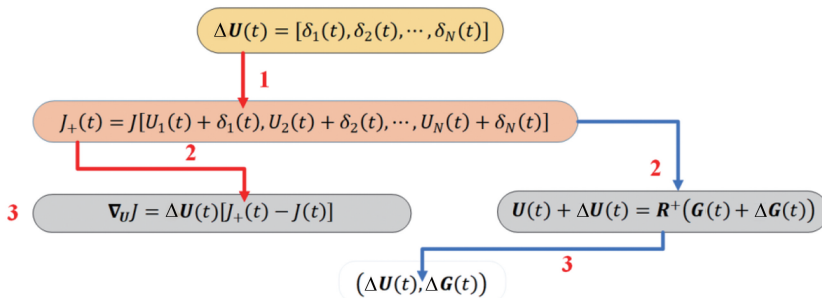


图 3 梯度的计算流程图

Fig. 3 Schematic of gradient calculation

(7)式中的 \mathbf{G} 可通过 H-S 传感器计算斜率得到。对于性能指标 J , 研究人员迄今已提出了多种性能评价函数^[13], 如斯特尔比值、像清晰度、环围能量、统计矩等。由于像清晰度函数的测量相对容易, 不但具有较高的空间频谱, 而且能够直观地反映光强分布, 当像差减小时, 像清晰度函数会朝着增大的方向变化, 因此本文选择像清晰度函数作为性能指标 J 。远场像清晰度评价函数为

$$J = \sum_{y=0}^N \sum_{x=0}^M I^2(x, y), \quad (8)$$

式中: $I(x, y)$ 为像素点 (x, y) 处的强度; 远场图像的大小为 $M \times N$ 。最后根据(7)式可以得到 \mathbf{R}^+ 的更新公式为

$$\mathbf{R}^+ = \mathbf{R}^+ - \alpha \nabla_{\mathbf{R}^+} J = \mathbf{R}^+ - \alpha \frac{\partial J}{\partial \mathbf{U}} \mathbf{G}, \quad (9)$$

式中: α 为学习速率。(9)式为线性模型, 为了避免模型随着时间延长而产生偏移, 影响驱动电压与波前斜率向量之间的泛化性, 通过递归最小二乘添加正则项 \mathbf{W} 来稳定响应矩阵 \mathbf{R}^+ , 并提高其泛化性。

2.2 递归最小二乘

由图 3 可得 t 时刻的在线样本为 $(\Delta \mathbf{G}(t), \Delta \mathbf{U}(t))$, 递归最小二乘在线更新模型公式为

$$\mathbf{e}(t) = \Delta \mathbf{U}(t) - \mathbf{W}(t-1) \Delta \mathbf{G}(t), \quad (10)$$

$$\mathbf{k}(t) = \frac{\mathbf{P}(t-1) \Delta \mathbf{G}(t)}{\lambda + \Delta \mathbf{G}^T(t) \mathbf{P}(t-1) \Delta \mathbf{G}(t)}, \quad (11)$$

$$\mathbf{P}(t) = \frac{1}{\lambda} [\mathbf{P}(t-1) - \mathbf{k}(t) \Delta \mathbf{G}(t) \mathbf{P}(t-1)], \quad (12)$$

$$\mathbf{W}(t) = \mathbf{W}(t-1) + \mathbf{k}(t) \mathbf{e}(t), \quad (13)$$

式中: λ 为遗忘因子, $0 < \lambda \leq 1$ 。(13)式为权重更新公式, 算法初始化为

$$\mathbf{W}(0) = \mathbf{R}^+, \mathbf{P}(0) = \delta^{-1} \mathbf{I} (0 < \delta \ll 1), \quad (14)$$

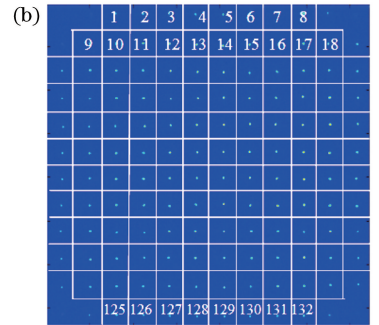
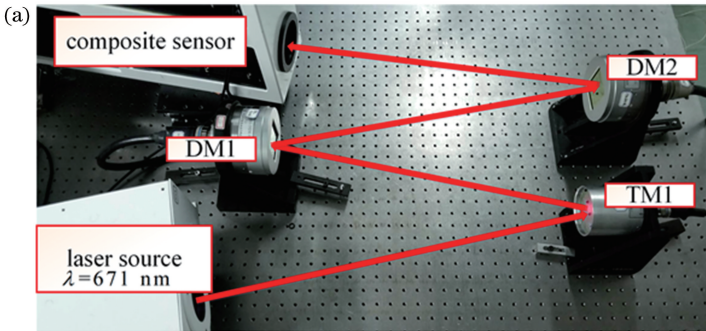


图 4 自适应光学硬件平台及 H-S 传感器有效子孔径的排布。
Fig. 4 Adaptive optical hardware platform and effective subaperture spots of H-S sensor.

(a) Hardware platform; (b) effective subaperture spots

式中: \mathbf{I} 为单位矩阵。如图 3 所示, 按照系统运行时间可以依次得到 t 时刻的训练样本 $(\Delta \mathbf{G}(t), \Delta \mathbf{U}(t))$, 然后根据(10)~(13)式更新一次 \mathbf{W} , 然后根据(15)式稳定响应矩阵^[13] \mathbf{R}^+ , 避免 H-S 子孔径光斑质心斜率与驱动器之间的响应关系偏离太大, 影响系统的收敛速度和稳定性。另外, \mathbf{R}^+ 中包含了先验知识, 可保证模型快速收敛。

$$\mathbf{R}^+ = \epsilon \mathbf{W}(t) + (1 - \epsilon) \mathbf{R}^+. \quad (15)$$

为了使模型兼顾收敛速度和收敛精度, 并解耦哈特曼传感器误差的影响, 根据以上分析制定了模型的控制流程:

1) 初始化响应矩阵 \mathbf{R}^+ , $\mathbf{W}(0) = \mathbf{R}^+$, $\mathbf{P}(0) = \delta^{-1} \mathbf{I} (0 < \delta \ll 1)$;

2) 通过 H-S 波前传感器得到斜率 $\mathbf{G}(t)$;

3) 计算 $\mathbf{U}(t) = a \cdot \mathbf{U}(t-1) + b \cdot \mathbf{R}^+ \mathbf{G}(t)$;

4) 添加扰动电压 $\Delta \mathbf{G}(t)$;

5) 得到样本 $(\Delta \mathbf{W}(t), \Delta \mathbf{U}(t))$, 计算梯度

$$\nabla_{\mathbf{R}^+} J = \frac{\partial J}{\partial \mathbf{U}} \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial \mathbf{R}^+} = \frac{\partial J}{\partial \mathbf{U}} \mathbf{G};$$

6) 根据公式 $\mathbf{R}^+ = \mathbf{R}^+ - \alpha \nabla_{\mathbf{R}^+} J$ 更新响应矩阵 \mathbf{R}^+ ;

7) 返回步骤 2);

8) 间隔时间 T_1 , 更新权值 $\mathbf{W}(t) = \mathbf{W}(t-1) + \mathbf{k}(t) \mathbf{e}(t)$;

9) 间隔时间 T_2 , $\mathbf{R}^+ = \epsilon \mathbf{W}(t) + (1 - \epsilon) \mathbf{R}^+$, ϵ 为权重系数, 取值范围为 $[0, 1]$ 。

采用上述流程就可以实现系统在线更新模型并校正波前畸变, 其中 T_1 和 T_2 对应的均为等间隔采样。

3 实验与分析

本文使用图 4 所示的自适应光学硬件平台^[14-18]

来验证 H-S 传感器在缺光和质心探测精度不高时的模型性能,该实验平台由复合传感器、激光器($\lambda=671\text{ nm}$)、变形镜(DM1、DM2 皆为 59 驱动单元)、倾斜镜(TM)组成。倾斜镜用于校正倾斜,变形镜 DM1 用于生成像差,DM2 用于像差校正。激光器发出的激光束通过变形镜 DM1 后到达变形镜 DM2,然后经 DM2 入射到复合传感器。复合传感器由分光镜、H-S 波前传感器、远场 CCD 和近场 CCD 组成,其中:分光镜将一部分光束通过透镜聚焦到远场相机,远场相机用来测量光束校正后的光斑,靶面大小为 $80\text{ pixel}\times 80\text{ pixel}$;H-S 波前传感器由 12×12 的透镜阵列和一个 $372\text{ pixel}\times 372\text{ pixel}$ 的 CCD 相机组成(每个子孔径为 $31\text{ pixel}\times$

31 pixel ,如图 5 所示,为了清晰地显示光斑形态,有效子孔径的序号只标 1~18 和 125~132);CCD 相机的采样频率为 500 Hz ,每个子孔径有两个测量方向(x 轴方向和 y 轴方向)。

本文可使收敛过程显示平滑并能反映统计意义,每种控制模型的性能指标使用斯特尔比值(SR, S_R)对迭代次数的均值来表示,即

$$S_R = \frac{\sum_{t=1}^N S_{R,t}}{N}, \quad (16)$$

式中: $S_{R,t}$ 为 t 时刻的 SR 值。传统控制模型的参数设置为: $a=0.98, b=0.1$;本文控制模型的参数设置为: $a=0.98, b=0.1, \epsilon=0.01, \lambda=0.95, T_1=3, T_2=30$ 。

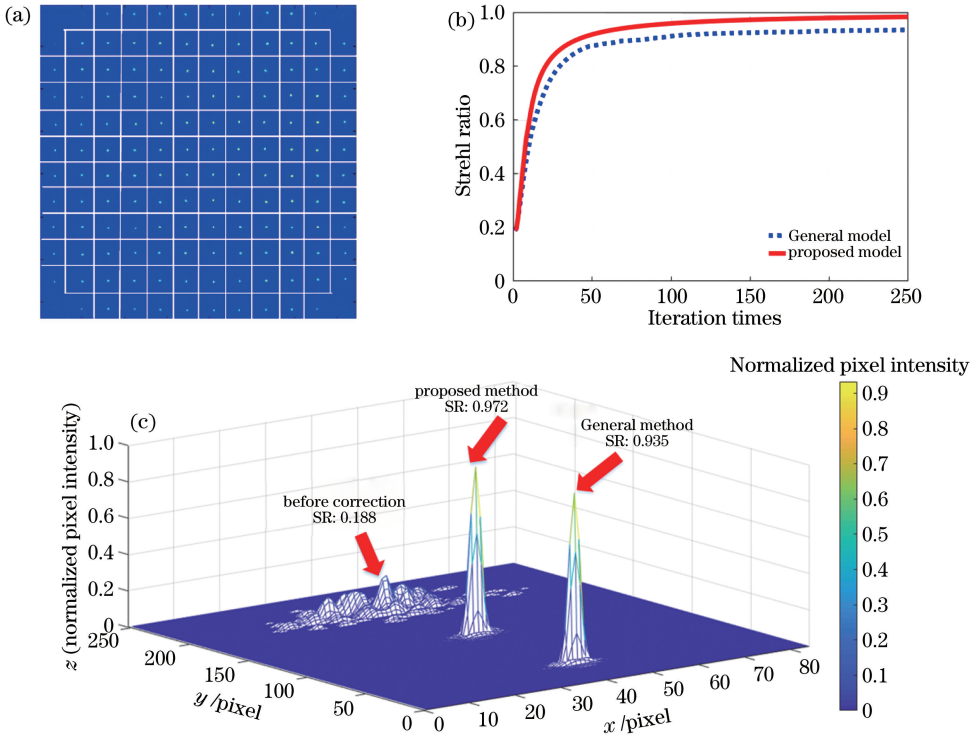


图 5 H-S 传感器的有效子孔径光斑、SR 均值的迭代过程以及系统收敛后的 SR 值。

(a)有效子孔径光斑;(b) SR 均值;(c)系统收敛后的 SR 值

Fig. 5 Effective subaperture spots of H-S sensor, iterative process of SR mean and SR values after system convergence. (a) Effective subaperture spots; (b) SR mean; (c) SR values after system convergence

首先,在质心探测理想的情况下,利用传统方法和本文方法进行像差校正,结果如图 5(b)、(c)所示,可见,本文模型收敛后的 SR 均值为 0.975,而基于直接斜率法的传统控制模型收敛后的 SR 均值为 0.931,说明本文所提模型的收敛精度高于传统模型。但是,本方法需要求解梯度,有额外的计算开销,主要的计算开销来源于像清晰度函数的计算,传统模型迭代一次的计算时间平均为 2 ms 。本文所提模型中的 T_1 和 T_2 参数可调,模型迭代一次的计

算时间平均为 2.4 ms ,可根据需要对算法和硬件进行优化(比如对算法作流水线处理,提高相机帧频等),以进一步提高性能。由图 5(b)可以看出,当 SR 达到 0.9 时,本文模型所需要的迭代次数更少,收敛速度约比传统模型快 2 倍。虽然 H-S 传感器质心探测理想,但 CCD 相机的噪声、模数转换的位数、背景光的强弱、广义逆矩阵的计算误差都会影响模型的收敛精度。本文模型利用远场指标的梯度减弱了子孔径斜率误差传递、广义逆矩阵计算误差的

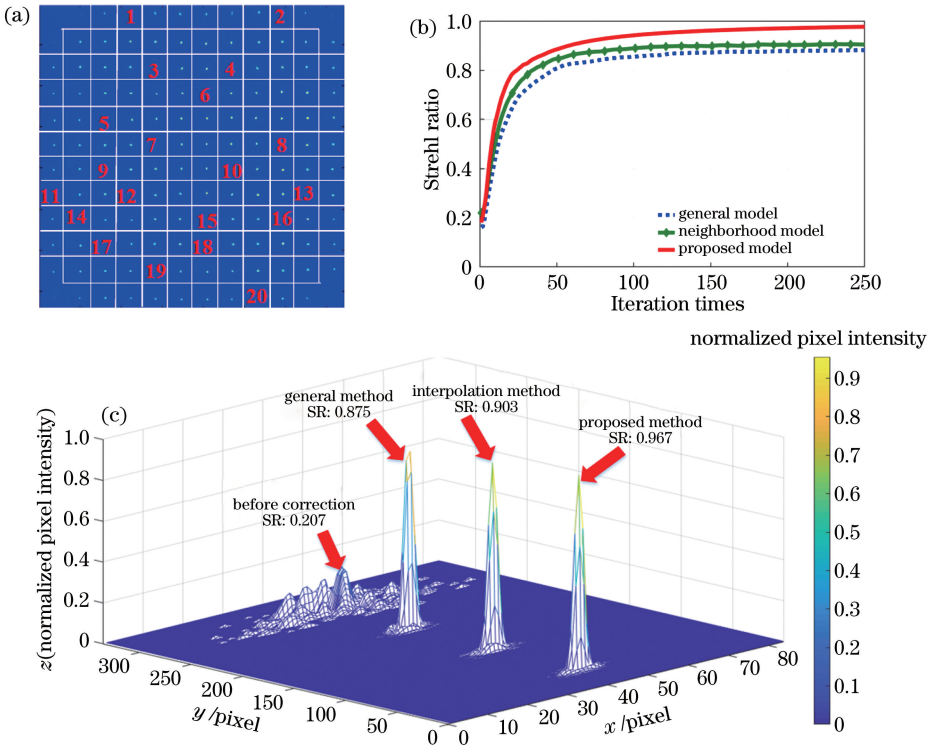


图 6 缺光条件下 H-S 传感器的 20 个子孔径以及 SR 的迭代过程、系统收敛后的 SR 值。

(a) 子孔径; (b) SR 的迭代过程; (c) 系统收敛后的 SR 值

Fig. 6 Twenty subapertures of H-S sensor under missing light condition, iterative process of SR and SR values after system convergence. (a) Subaperture; (b) iterative process of SR; (c) SR values after system convergence

影响,因此在质心探测理想的条件下收敛精度高于传统模型。

图 6(a)给出了质心探测不理想情况下的 20 个子孔径,使用传统方法、所提方法、四邻域插值方法对像差进行校正,校正结果如图 6(b)、(c)所示。其中,传统方法对于缺失的子孔径斜率直接置零。四邻域插值原理如图 7 所示。

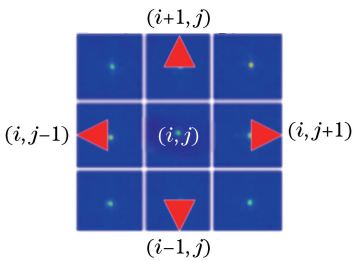


图 7 四邻域插值示意图

Fig. 7 Schematic of neighborhood interpolation

插值计算公式为

$$\mathbf{s}_{i,j} = \frac{\mathbf{s}_{i+1,j} + \mathbf{s}_{i,j+1} + \mathbf{s}_{i-1,j} + \mathbf{s}_{i,j-1}}{4}, \quad (17)$$

式中: $\mathbf{s}_{i,j}$ 为坐标 (i, j) 的子孔径斜率向量。由图 6(b)可以看出,本文所提方法收敛后的 SR 均值为 0.964,传统方法控制模型收敛后的 SR 均值为

0.881,插值法控制模型收敛后的 SR 均值为 0.903。显然,所提方法的控制精度高于传统方法和插值法,收敛后的 SR 均值与图 5(b)相比有了明显的变化,在质心探测不理想的情况下,传统方法的 SR 均值下降了 0.050,插值法的 SR 均值下降了 0.028,所提方法的 SR 均值下降了 0.011。很明显,所提方法受到输入质心斜率的影响更小。但是所提方法与图 5(b)相比平均收敛曲线变得更平缓,这是因为输入质心斜率缺失信息,初始响应矩阵不能快速到达比较好的控制位置,需要利用远场指标的梯度进一步更新模型才能使系统收敛。

图 8(a)给出了质心探测不理想情况下的 40 个子孔径,利用三种方法进行像差校正,校正结果如图 8(b)、(c)所示。本文方法收敛后的 SR 均值为 0.954,传统法收敛后的 SR 均值为 0.772,插值法收敛后的 SR 均值为 0.844。收敛后的 SR 均值与图 5、图 6 相比有明显变化,在质心探测不理想的情况下,传统方法的性能下降得最大,其次是插值法,而所提方法的性能基本保持稳定。从图 8(b)可以看出,所提方法的收敛过程变得缓慢,通过模型的理论分析可知,初始响应矩阵在不能使系统达到良好精度的

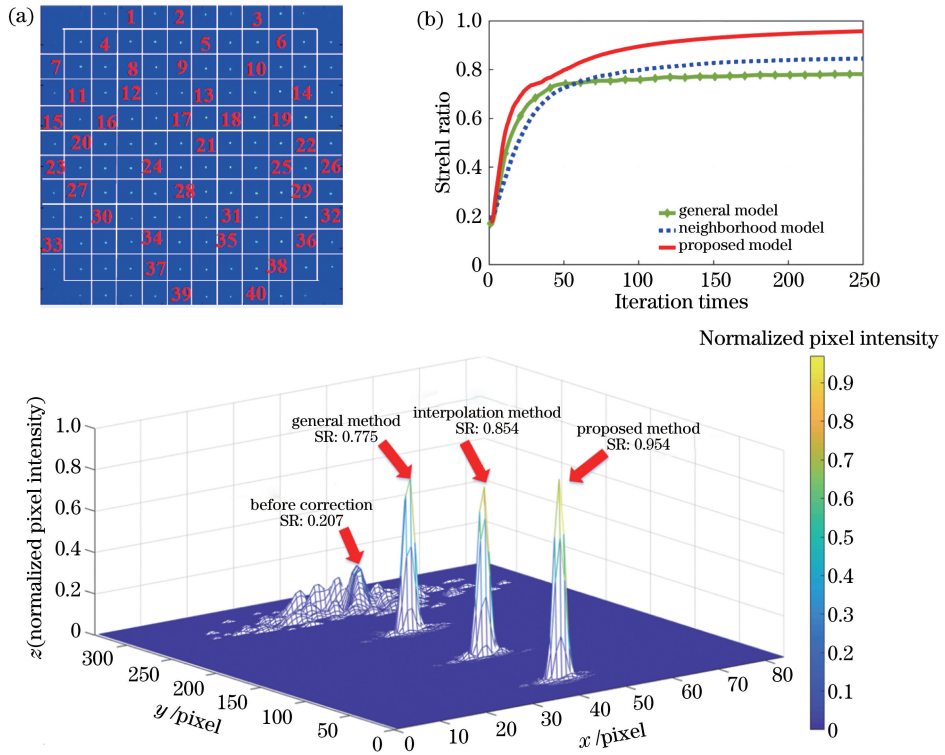


图 8 缺光条件下 H-S 传感器的 40 个子孔径以及 SR 迭代过程、系统收敛后的 SR 值。

(a) 子孔径; (b) SR 迭代过程; (c) 系统收敛后的 SR 值

Fig. 8 Forty subapertures of H-S sensor under missing light condition, iterative process of SR and SR values after system convergence. (a) Subaperture; (b) iterative process of SR; (c) SR values after system convergence

情况下,需要远场指标梯度的引导才能使响应矩阵更适应当前的系统状态。由于梯度下降法需要更新时间,因此子孔径信息缺失越多,模型的收敛过程就越缓慢,但系统收敛精度与无模型控制方法相当。

最后,采用 DM1 随机生成 100 个像差,然后使用 DM2 进行像差校正。图 9 所示为三种方法在不同质心探测条件下收敛后的 SR 均值,可以看出:随着斜率信息缺失的增多,传统方法的收敛精度迅速降低,这是由于静态测量的响应矩阵不能够自适应系统状态的变化,误差由输入端传递到控制器,偏离

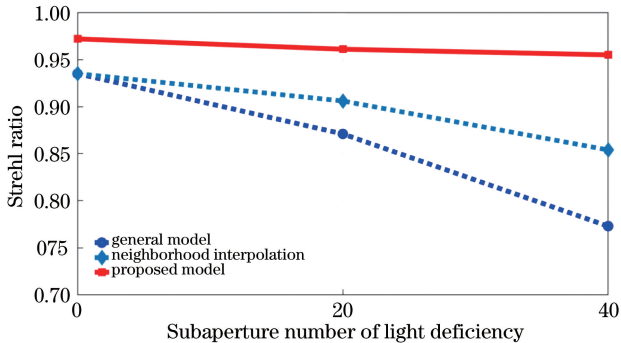


图 9 不同质心探测条件下三种方法的校正性能

Fig. 9 Correction performance of three methods under different centroid detection conditions

控制目标;虽然插值法在不同条件下的控制精度有所提升,但是由于插值方法为近似处理,因此模型输出的控制电压有误差,会导致性能下降;所提方法解耦了误差传递,通过在线自学习保证了自适应性、控制稳定性和控制精度,本质上该方法的收敛精度受远场指标的影响,输入质心斜率只是为了保证模型快速收敛,当然缺失的质心斜率信息越多,收敛速度也会越慢。对于极端情况下的无波前自适应光学系统,本文所提方法的收敛速度和收敛精度等价于无模型的 SPGD 方法。

4 结 论

H-S 传感器的斜率误差通过响应矩阵传递到控制器,因此导致系统的控制精度降低。本文所提方法能够在线自学习系统状态,并能够通过远场指标梯度减弱 H-S 斜率误差传递的影响,因此模型的收敛精度高于传统方法。采用稳定的梯度估计方法是提高学习效率的关键,适当的梯度优化方法可以进一步提高模型的收敛速度,值得进一步研究。实验结果表明:系统需要在线动态学习系统状态才能自适应系统状态,基于直接斜率法的控制方法使用静态数据不具有自适应性,不能自适应系统状态的变

化。值得注意的是,在质心斜率信息完全缺失的情况下,本文所提方法等价于基于无模型的 SPGD 方法。

参 考 文 献

- [1] Jiang W H. Overview of adaptive optics development [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(3): 1-15.
姜文汉. 自适应光学发展综述[J]. *光电工程*, 2018, 45(3): 1-15.
- [2] Primot J. Theoretical description of Shack-Hartmann wave-front sensor [J]. *Optics Communications*, 2003, 222(1/2/3/4/5/6): 81-92.
- [3] Canovas C, Ribak E N. Comparison of Hartmann analysis methods[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(10): 1830-1835.
- [4] Talmi A, Ribak E N. Direct demodulation of Hartmann-Shack patterns[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2004, 21(4): 632-639.
- [5] Soloviev O, Vdovin G. Hartmann-Shack test with random masks for modal wavefront reconstruction [J]. *Optics Express*, 2005, 13(23): 9570-9584.
- [6] Neal D, Copland J, Neal D A. Shack-Hartmann wavefront sensor precision and accuracy [J]. *Proceedings of SPIE*, 2002, 4779: 148-160.
- [7] Zheng Z Y, Li C W, Li B M, et al. Analysis and demonstration of PID algorithm based on arranging the transient process for adaptive optics[J]. *Chinese Optics Letters*, 2013, 11(11): 110101.
- [8] Vorontsov M A, Carhart G W, Ricklin J C. Adaptive phase-distortion correction based on parallel gradient-descent optimization [J]. *Optics Letters*, 1997, 22(12): 907-909.
- [9] Zhang Y D, Rao C H, Li X Y. Adaptive optics and laser control[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016.
张雨东, 饶长辉, 李新阳. 自适应光学及激光操控[M]. 北京: 国防工业出版社, 2016.
- [10] Jiang W, Huang S, Ling N, et al. Hill-climbing wavefront correction system for large laser engineering [C] // Technical Symposium. International Society for Optics and Photonics. [S.l.:s.n.], 1989.
- [11] Yang P, Ao M W, Liu Y, et al. Intracavity transverse modes controlled by a genetic algorithm based on Zernike mode coefficients [J]. *Optics Express*, 2007, 15(25): 17051.
- [12] Zommer S, Ribak E N, Lipson S G, et al. Simulated annealing in ocular adaptive optics [J]. *Optics Letters*, 2006, 31(7): 939-941.
- [13] 周仁忠, 阎吉祥. 自适应光学理论[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1996.
- [14] Guo Y M, Rao C H, Bao H, et al. Direct computation of the interaction matrix of adaptive optical system [J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(14): 149501.
郭友明, 饶长辉, 鲍华, 等. 一种自适应光学系统响应矩阵的直接计算方法[J]. *物理学报*, 2014, 63(14): 149501.
- [15] Lin H Q, Yang P, Kong Q F, et al. Experimental verification of wavefront correction based on linear quadratic Gaussian control [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(7): 0705004.
林海奇, 杨平, 孔庆峰, 等. 基于线性二次高斯控制的波前校正实验验证[J]. *中国激光*, 2019, 46(7): 0705004.
- [16] Cheng T, Liu W J, Yang K J, et al. Decoupling control algorithm based on Laplacian eigenfunction for Woofer-Tweeter adaptive optics system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(9): 0905003.
程涛, 刘文劲, 杨康健, 等. 基于拉普拉斯本征函数的 Woofer-Tweeter 自适应光学系统解耦控制算法[J]. *中国激光*, 2018, 45(9): 0905003.
- [17] Lai B H, Dong L Z, Chen S Q, et al. Hybrid adaptive optics system for a solid-state zigzag master oscillator power amplifier laser system [J]. *Chinese Optics Letters*, 2016, 14(9): 091402.
- [18] Lai B H, Dong L Z, Yu X, et al. Adaptive compensation of intracavity tilts during lasing through detecting the direction of output beams [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(2): 164-170.