

基于线性二次高斯控制的波前校正实验验证

林海奇^{1,2,3}, 杨平^{1,2*}, 孔庆峰^{1,2,3,4}, 许冰^{1,2}

¹中国科学院自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209;

²中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209;

³中国科学院大学, 北京 100049;

⁴电子科技大学光电信息学院, 四川 成都 610054

摘要 针对比例积分控制算法在自适应光学校正性能方面的缺陷, 从建立自适应光学系统的模型出发, 利用线性二次高斯(LQG)控制算法来提升自适应光学系统的校正性能, 并在实际系统中进行了实验验证。与比例积分控制实验的对比结果表明, LQG 控制校正后的远场光斑光强值可从 3000 ADU 提升到 3700 ADU, 残余波前方均根值可从 0.039 μm 下降到 0.026 μm 。LQG 控制可抑制闭环后远场光斑的剧烈抖动, 提高变形镜的电压收敛速度, 进一步提高自适应光学系统的稳定性和响应速度。

关键词 自适应光学; 比例积分控制; 线性二次高斯控制; 波前校正; 远场光斑

中图分类号 TN209

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0705004

Experimental Verification of Wavefront Correction Based on Linear Quadratic Gaussian Control

Lin Haiqi^{1,2,3}, Yang Ping^{1,2*}, Kong Qingfeng^{1,2,3,4}, Xu Bing^{1,2}

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

²Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

⁴School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China

Abstract In order to solve the defect of the proportional-integral control algorithm in adaptive optical correction performance, a linear quadratic Gaussian (LQG) control method is proposed to improve the correction performance of the adaptive optical system. Experimental verification in the actual system is performed in this paper. Compared with the proportional-integral control, the LQG control method can improve the peak intensity of the far-field spot from 3000 ADU to 3700 ADU, and decrease the root mean square value of the residual wavefront from 0.039 μm to 0.026 μm . The LQG control method can also suppress the violent jitter of the far-field optical field after closed-loop and improve the convergence speed of the deformed mirror voltage, further improving the stability and response speed of the adaptive optical system.

Key words adaptive optics; proportional-integral control; linear quadratic Gaussian method; wavefront correction; far-field spot

OCIS codes 010.1080; 110.1080; 140.3300

1 引 言

自适应光学系统最初被广泛应用于天文望远镜中的大气湍流校正, 以获取高分辨率的图像^[1-2], 现

在则被广泛应用于激光传输系统校正激光的波前畸变, 从而获得更高的光束质量^[3-5]。目前, 大多数自适应光学系统采用的是简单而易于实现的比例积分控制。虽然比例积分控制可以在不同的条件下实现

收稿日期: 2019-02-26; 修回日期: 2019-03-20; 录用日期: 2019-03-28

基金项目: 国家重大科研装备研制项目(ZDYZ2013-2)、国家自然科学基金(11704382)

* E-mail: pingyang2516@163.com

波前校正,但是有时其校正结果难以满足实际需求。而且,比例积分控制参数调节时多依赖人为经验,在大多数情况下为了维持自适应光学系统的稳定性往往要牺牲比例积分控制的校正性能,难以做到同时兼顾。虽然国内外提出了一些比例积分控制的改进算法^[6],而且这些方法在校正性能上有所提升,但是其控制器结构并没有发生改变,依然无法解决比例积分控制的缺点。目前国内外也有一些新的控制算法被提出,但是大多数局限于理论仿真阶段^[7-10]。因此,本文提出采用线性二次高斯(LQG)控制来提升自适应光学系统的校正性能。

自适应光学系统波前校正的实质是最小化残余波前,而 LQG 控制作为最优控制的一种,它以追求最优性能指标为控制目标,利用线性二次准则实现性能指标的最优控制,从本质上讲 LQG 控制比较适合自适应光学系统。目前,LQG 控制在自适应光学系统中得到了广泛的关注。Paschall 等^[11]首次在自适应光学系统中提出 LQG 控制并进行仿真验证其可行性。在随后的几年里,Looze 等^[12-14]和 Le Roux 等^[15]分别在自适应光学系统中设计了 LQG 控制器,并进行了仿真验证。但是该方法却没有在自适应光学系统中得到广泛的应用,这是因为 LQG 控制需要被控对象的精准模型,而自适应光学系统建模问题一直是自适应光学系统的一个难点。

本文根据入射波前的泽尼克波前相位信息和变形镜(DM)与波前传感器(WFS)的线性关系提出一种建立自适应光学系统模型的方法,这种建模方法可以准确地表征自适应光学系统的性质,且计算量小,与其对应的 LQG 控制器结构简单。更重要的是,该建模方法不仅可以为 LQG 控制在自适应光学系统中实现提供模型基础,还可以为其他模型类控制算法在自适应光学系统中应用提供模型基础。本文以此模型为基础,为自适应光学系统设计 LQG 控制器,在实际系统中进行实验验证,并与比例积分控制实验结果进行对比分析。

2 基本原理

2.1 自适应光学系统模型

自适应光学系统由 WFS、DM 与控制器组成,如图 1(a)所示。WFS 探测波前斜率信息,经过波前复原计算出 DM 的控制电压,然后通过控制器实时校正入射波前。若假设 WFS 的采样周期为 T ,则 WFS 整合残余波前的时间为 T ,WFS 相机采集与斜率计算的时间也为 T ,如图 1(b)所示。则自适

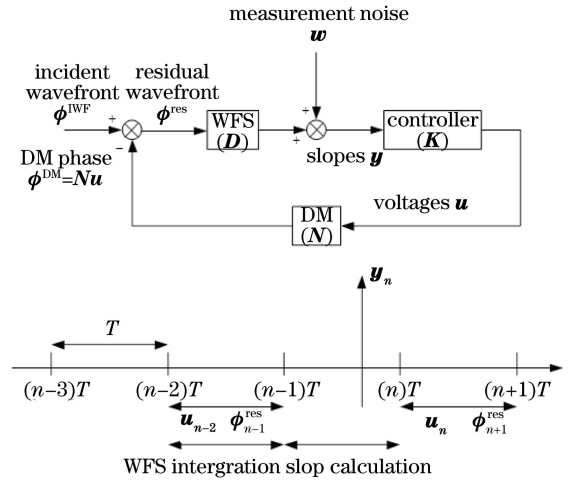


图 1 自适应光学系统。(a)方框图;(b)时序图
Fig. 1 Adaptive optical system. (a) Block diagram;
(b) temporal diagram

应光学系统存在两个时间周期的延迟。

根据图 1(a)可得

$$y_n = D\phi_{n-1}^{res} + w_n, \quad (1)$$

式中: D 为 WFS 的线性响应矩阵; w_n 为测量噪声; ϕ_{n-1}^{res} 为残余波前; y_n 为 WFS 的斜率测量值; n 为时刻。根据图 1(b)可得到残余波前为

$$\phi_{n-1}^{res} = \phi_{n-1}^{IWF} - \phi_{n-1}^{DM}, \quad (2)$$

式中: ϕ_{n-1}^{IWF} 为入射波前的相位; ϕ_{n-1}^{DM} 为 DM 产生的波前相位。

假设 DM 为瞬时响应,其电压计算与控制时间可忽略不计,则 DM 产生的波前相位为

$$\phi_{n-1}^{DM} = Nu_{n-2}, \quad (3)$$

式中: N 为 DM 的影响矩阵; u_{n-2} 为 DM 的控制电压。根据(1)式可得

$$y_n = D(\phi_{n-1}^{IWF} - Nu_{n-2}) + w_n. \quad (4)$$

利用泽尼克多项式描述入射波前的相位,这种描述可以看作是一个与时间和滤波过程的近似^[16-17]。则根据泽尼克相位信息,入射波前的相位为

$$\phi_{n+1}^{IWF} = A^{IWF}\phi_n^{IWF} + v_n, \quad (5)$$

式中: v_n 为高斯白噪声; A^{IWF} 为对角阵,其对角线上的元素 a_{ii} 与泽尼克多项式系数有关,其表达式为

$$a_{ii} = \exp\left[-0.3(n_z + 1) \frac{V\Delta T}{D_p}\right], \quad (6)$$

式中: n_z 为泽尼克径向阶数; V 为风速; ΔT 为采样间隔; D_p 为 WFS 的入射口径。

根据(1)、(4)、(5)式,可以得到自适应光学系统状态空间模型为

$$\begin{cases} x_{n+1} = Ax_n + Bu_n + Hw_n \\ y_n = Cx_n + w_n \end{cases}, \quad (7)$$

式中: \mathbf{x}_n 为状态向量; \mathbf{A} 、 \mathbf{B} 、 \mathbf{C} 、 \mathbf{H} 为状态空间矩阵。过程噪声 \mathbf{v}_n 和测量噪声 \mathbf{w}_n 均为高斯白噪声, 其中状态向量 \mathbf{x}_k 为

$$\mathbf{x}_k = [\boldsymbol{\phi}_n^{\text{IWF}} \quad \boldsymbol{\phi}_{n-1}^{\text{IWF}} \quad \mathbf{u}_{n-1} \quad \mathbf{u}_{n-2}]^{\text{T}}, \quad (8)$$

式中: T 表示矩阵的转置。则(7)式的状态空间矩阵为

$$\begin{cases} \mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}^{\text{IWF}} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{I} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{I} & \mathbf{0} \end{bmatrix}, \\ \mathbf{B} = [\mathbf{0} \quad \mathbf{0} \quad \mathbf{I} \quad \mathbf{0}]^{\text{T}} \\ \mathbf{C} = [\mathbf{0} \quad \mathbf{D} \quad \mathbf{0} \quad -\mathbf{DN}] \\ \mathbf{H} = [\mathbf{I} \quad \mathbf{0} \quad \mathbf{0} \quad \mathbf{0}]^{\text{T}} \end{cases}, \quad (9)$$

式中: \mathbf{I} 为单位矩阵。

这就是自适应光学系统建模法, 接下来将根据此模型实现 LQG 控制。

2.2 LQG 控制

LQG 控制以最优性能指标为控制目标。本文选取最优性能指标为最小化残余波前, 其性能指标为

$$\begin{aligned} J^{\text{AO}}(\mathbf{u}) &= \lim_{K \rightarrow \infty} \frac{1}{K} \sum_{n=0}^{K-1} \|\boldsymbol{\phi}_n^{\text{res}}\|^2 = \\ & \lim_{K \rightarrow \infty} \frac{1}{K} \sum_{n=0}^{K-1} \|\boldsymbol{\phi}_{n+1}^{\text{IWF}} - \boldsymbol{\phi}_{n+1}^{\text{DM}}\|^2 = \\ & \lim_{K \rightarrow \infty} \frac{1}{K} \sum_{n=0}^{K-1} \|\boldsymbol{\phi}_{n+1}^{\text{IWF}} - \mathbf{N}\mathbf{u}_n\|^2, \end{aligned} \quad (10)$$

式中: K 为时间长度。

若(10)式存在最优解, 则

$$\mathbf{u}_n = (\mathbf{N}^{\text{T}}\mathbf{N})^{-1}\mathbf{N}^{\text{T}}\boldsymbol{\phi}_{n+1}^{\text{IWF}}. \quad (11)$$

在(11)式中, 入射波前是自适应光学系统状态向量的一个未知量。为了能准确求解性能指标, 将(11)式改写为

$$\mathbf{u}_n = \mathbf{K}\mathbf{x}_{(n+1)/n}, \quad (12)$$

式中: $\mathbf{x}_{(n+1)/n}$ 为状态向量; \mathbf{K} 的表达式为

$$\mathbf{K} = [(\mathbf{N}^{\text{T}}\mathbf{N})^{-1}\mathbf{N}^{\text{T}} \quad \mathbf{0} \quad \mathbf{0} \quad \mathbf{0}]. \quad (13)$$

从而, 最小化性能指标的问题就转换成如何求取一个状态向量 $\mathbf{x}_{(n+1)/n}$, 使其性能指标达到最优的问题。

借助卡尔曼滤波器来求取状态向量估计 $\mathbf{x}_{(n+1)/n}$ 。根据卡尔曼滤波器原理可以得到

$$\mathbf{x}_{(n+1)/n} = \mathbf{A}\mathbf{x}_{n/(n-1)} + \mathbf{B}\mathbf{u}_n + \mathbf{L}[\mathbf{y}_n - \mathbf{C}\mathbf{x}_{n/(n-1)}], \quad (14)$$

式中: \mathbf{L} 为卡尔曼增益矩阵, 其表达式为

$$\mathbf{L} = \mathbf{A}\mathbf{X}_{n/(n-1)}\mathbf{C}^{\text{T}}[\mathbf{C}\mathbf{X}_{n/(n-1)}\mathbf{C}^{\text{T}} + \mathbf{C}_w]^{-1}, \quad (15)$$

式中: \mathbf{C}_w 为测量噪声 $\mathbf{w}(k)$ 的协方差矩阵; $\mathbf{X}_{n/(n-1)}$ 为(16)式 Riccati 方程的解, 可表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_{(n+1)/n} &= \mathbf{A}\mathbf{X}_{n/(n-1)}\mathbf{A}^{\text{T}} + \mathbf{C}_v - \\ & \mathbf{A}\mathbf{X}_{n/(n-1)}\mathbf{C}^{\text{T}}[\mathbf{C}\mathbf{X}_{n/(n-1)}\mathbf{C}^{\text{T}} + \mathbf{C}_w]^{-1}\mathbf{C}\mathbf{X}_{n/(n-1)}\mathbf{A}^{\text{T}}, \end{aligned} \quad (16)$$

式中: \mathbf{C}_v 为过程噪声 $\mathbf{v}(k)$ 的协方差矩阵。

综上所述, LQG 控制以最小化残余波前为性能指标, 通过对性能指标进行求解, 得到(12)式。为了实现 LQG 控制, 借助卡尔曼滤波器来求取状态量估计, 通过求解(16)式的 Riccati 方程继而求出(15)式的卡尔曼增益, 根据(14)式可以求出状态向量估计 $\mathbf{x}_{(n+1)/n}$, 实现最小化残余波前的性能指标。

3 实验验证

根据前一节自适应光学系统建模和 LQG 控制原理的介绍, 本节通过实验对 LQG 控制的波前校正能力进行验证。LQG 控制的实现步骤为:

1) 根据风速 V 、入射口径 D_p 和泽尼克径向阶数 n_z , 利用(6)式计算 \mathbf{A}^{IWF} , 进而确定自适应光学系统状态空间模型矩阵 \mathbf{A} 、 \mathbf{B} 、 \mathbf{C} 、 \mathbf{H} 。

2) 确定状态向量估计 $\mathbf{x}_{(n+1)/n}$ 。首先根据(16)式求取 Riccati 方程的解 $\mathbf{X}_{n/(n-1)}$, 然后根据(15)式计算卡尔曼增益矩阵 \mathbf{L} , 最后, 根据(14)式求取状态向量估计 $\mathbf{x}_{(n+1)/n}$ 。

3) 根据(12)、(13)式计算 DM 最终控制电压 $\mathbf{u}_{\text{end}} = \mathbf{K}\mathbf{x}_{(n+1)/n}$ 。

LQG 控制的实现是根据前一时刻的输入、输出以及状态向量对下一时刻的状态向量进行预测和估计, 进而计算最终的 DM 控制电压, 即

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{(n+1)/n} = \mathbf{A}\mathbf{x}_n + \mathbf{B}\mathbf{u}_n + \mathbf{L}[\mathbf{y}_n - \mathbf{C}\mathbf{x}_{n/(n-1)}] \\ \mathbf{u}_{\text{end}} = \mathbf{K}\mathbf{x}_{(n+1)/n} \end{cases}. \quad (17)$$

实验中比例积分控制形式如下:

$$\mathbf{u}_{\text{end}} = P_a\mathbf{u}(k-1) + P_b\mathbf{u}(k), \quad (18)$$

式中: 比例积分控制器参数 $P_a = 0.998$, $P_b = 0.15$; \mathbf{u} 的表达式为

$$\mathbf{u} = \mathbf{R}\mathbf{G}, \quad (19)$$

式中: \mathbf{R} 为自适应光学系统的传函矩阵; \mathbf{G} 为哈特曼传感器子孔径光斑的斜率。

3.1 实验描述

自适应光学系统实验装置图如图 2 所示, 该实验装置由激光器、光阑、像差板、两个倾斜镜(TTM)、DM 和夏克-哈特曼 WFS 组成。TTM 用来校正低阶像差, 59 个驱动单元的 DM 用于高阶像

差校正。夏克-哈特曼 WFS 由 12×12 的透镜阵列 (有效子孔径为 112 个) 和一个 $288 \text{ pixel} \times 288 \text{ pixel}$ 的 CCD 相机组成 (每个子孔径为 24 pixel), 其中 CCD 相机采样频率为 1000 Hz, 远场图像相机的像素为 $128 \text{ pixel} \times 128 \text{ pixel}$ 。

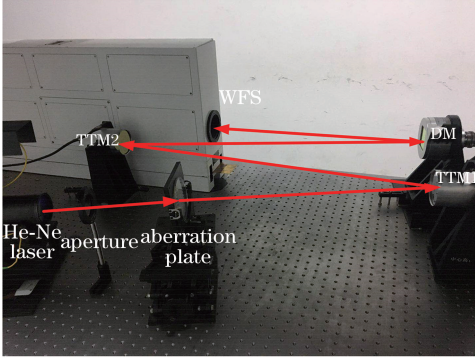


图 2 自适应光学系统实验设备

Fig. 2 Experimental equipment of adaptive optical system

根据前一节的自适应光学系统模型的建立方法, 建立自适应光学系统模型, 其参数如下: 实验在室内进行, 风速 V 为零, WFS 的入射口径 $D_p = 6 \text{ cm}$, 这里只考虑前 65 阶泽尼克模式, 因此泽尼克径向阶数 $n_z = 10$ 。

3.2 LQG 控制实验结果

根据第 2 节后半部分设计 LQG 控制, 在图 2 所示的实际自适应光学系统上进行实验, 实验结果如图 3 所示。图 3 表明 LQG 控制校正效果明显, 其中 X 和 Y 分别表示远场图像相机的版面, ADU 表示灰度值。校正后的远场光斑形态较好, 其光强值至少提升了 17 倍。

由图 4 可以看出, 基于 LQG 控制的自适应光学系统闭环后, 波前像差在 X 方向和 Y 方向上的斜率都减小了很多, 且 DM 的电压收敛速度快速而又稳定。

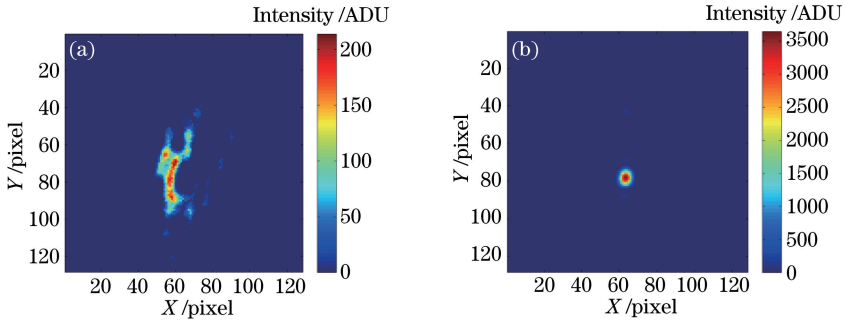


图 3 基于 LQG 控制的校正结果。(a)校正前的远场光斑图像;(b)校正后的远场光斑图像

Fig. 3 Correction results based on LQG. (a) Far-field spot before correction; (b) far-field spot after correction

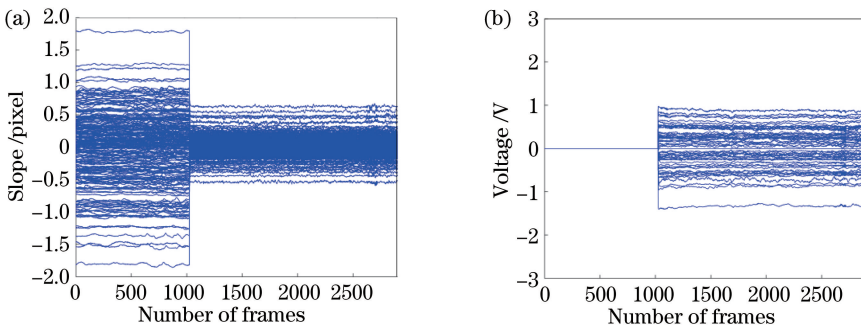


图 4 校正前后的斜率曲线与电压曲线。(a)校正前后的 WFS 的斜率曲线;(b)校正后 DM 的电压曲线

Fig. 4 Slope curves and voltage curves before and after correction. (a) Slope curves of WFS before and after correction; (b) voltage curves of DM after correction

为了进一步验证 LQG 控制的波前校正性能, 接下来将比例积分控制的波前校正实验结果进行对比。根据(18)和(19)式实现比例积分控制。对比实验结果如下。

由图 5 可知, 比例积分(PI)控制校正后的残余波前方均根值(RMS)为 $0.039 \mu\text{m}$, 而 LQG 控制的

为 $0.026 \mu\text{m}$, 由图可知 LQG 控制校正后的残余波前 RMS 明显小于比例积分控制。与比例积分控制相比, LQG 控制可以显著提升自适应光学系统的校正能力。

根据图 6, LQG 控制校正后的远场光强值基本都在 3500 ADU 以上, 而比例积分控制的远场光强

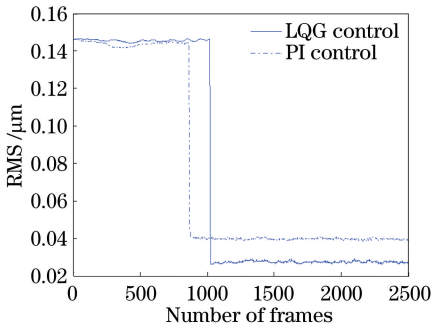


图 5 校正后的残余波前的 RMS 对比

Fig. 5 Comparison of RMS of residual wavefront after correction

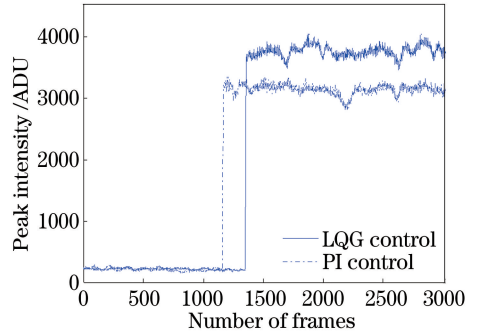


图 6 校正后的远场光斑光强值对比

Fig. 6 Comparison of peak intensities (PI) of far-field spots after correction

值平均在 3000 ADU 左右,这说明与比例积分控制相比,LQG 控制可显著提高自适应光学系统的校正效果。

由图 7 可以看出:比例积分控制的 DM 电压曲线收敛速度较慢,且抖动剧烈,部分驱动器电压已超过 DM 限幅电压 ± 3 V;比例积分控制的 DM 电压

收敛曲线在达到稳定前有一个明显的上升调节过程,其时间大约为 1000 frame;LQG 控制 DM 电压曲线的收敛速度较快,且收敛后的曲线比较平稳,这表明相比于比例积分控制,LQG 控制可提高自适应光学系统的响应速度。

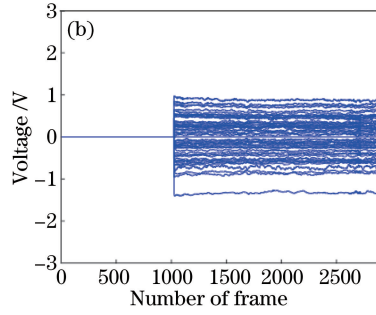
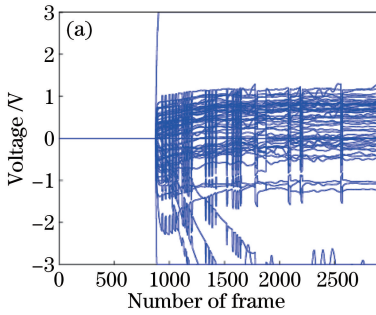


图 7 闭环后的 DM 电压收敛曲线。(a)比例积分控制的 DM 电压收敛曲线;(b) LQG 控制的 DM 电压收敛曲线

Fig. 7 Actuator voltages of DM after correction. (a) Actuator voltage of DM based on proportional-integral control; (b) actuator voltage of DM based on LQG control

图 8 为校正后远场光斑的斜率曲线图,可知:比例积分控制闭环校正后,远场光斑 X 方向和 Y 方向的斜率曲线先是上下振荡,然后才逐渐稳定,这表明校正后的远场光斑出现剧烈抖动现象;LQG 控制闭

环后的远场光斑两个方向的斜率曲线都比较平稳,这表明校正后的远场光斑比较稳定。自适应光学系统的稳定性主要是通过 DM 闭环后电压收敛曲线是否平稳和闭环后远场光斑是否出现剧烈抖动来表

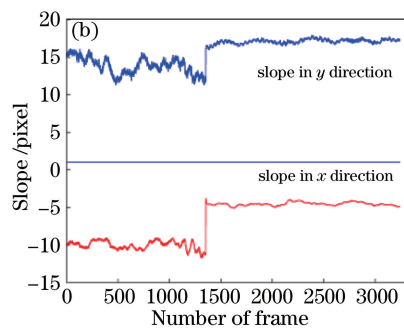
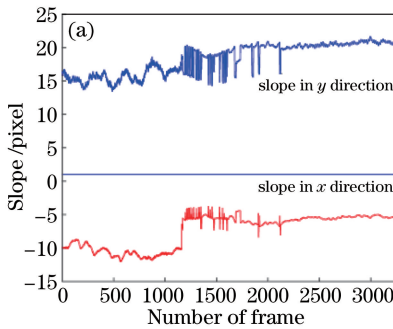


图 8 校正后远场光斑斜率曲线图对比。(a)比例积分控制的远场光斑斜率曲线图;(b) LQG 控制的远场光斑斜率曲线图

Fig. 8 Slope curves of far-field spot after correction. (a) Slope curves of far-field spot after correction based on proportional-integral control; (b) slope curves of far-field spot based on LQG control

征的。根据图 7, LQG 控制的 DM 电压曲线收敛速度快, 且收敛后的曲线比较平稳; 而根据图 8, LQG 控制可抑制闭环后的远场光斑抖动, 进一步提高自适应光学系统闭环后的稳定性。综上所述, LQG 控制可以进一步提高自适应光学系统的稳定性。

4 结 论

提出了采用 LQG 控制提升自适应光学系统校正性能的方法, 由于 LQG 控制应用最大的前提是需要一个精准的系统模型, 根据入射波前的泽尼克相位信息与 DM 和 WFS 的线性关系提出了建立自适应光学系统模型的方法, 为实现 LQG 控制提供模型基础。实验结果表明, LQG 控制校正后的残余波前 RMS 和远场光斑的光强值优于比例积分控制。从实验结果上看, 与比例积分控制相比, LQG 控制可以抑制闭环后远场光斑的剧烈抖动, 并使 DM 电压收敛快速且平稳, 可以进一步提升自适应光学系统的响应速度和系统的稳定性。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Goncharov A V, Devaney N, Dainty C. Atmospheric dispersion compensation for extremely large telescopes[J]. Optics Express, 2007, 15(4): 1534-1542.
- [3] Liu S Z, Ren D Q. Simulation on solar ground-layer adaptive optics system based on YAO software[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(9): 090101.
刘思臻, 任德清. 基于 YAO 软件的太阳地表层自适应光学系统的仿真[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(9): 090101.
- [4] Yu X, Dong L Z, Lai B H, *et al.* Adaptive aberration correction of a 5 J/6.6 ns/200 Hz solid-state Nd:YAG laser[J]. Optics Letters, 2017, 42(14): 2730-2733.
- [5] Li R, Griffith M, Laycock L, *et al.* Controllable continuous-wave Nd:YVO₄ self-Raman lasers using intracavity adaptive optics[J]. Optics Letters, 2014, 39(16): 4762-4765.
- [6] Dessenne C, Madec P Y, Rousset G. Optimization of a predictive controller for closed-loop adaptive optics [J]. Applied Optics, 1998, 37(21): 4623-4633.
- [7] Song D, Li X Y, Peng Z M. Mixed sensitivity H-infinity control of an adaptive optics system [J]. Optical Engineering, 2016, 55(9): 094106.
- [8] Yan Z J, Li X Y, Rao C H. Numerical simulation of a prediction control algorithm for close-loop adaptive optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(1): 0101003.
颜召军, 李新阳, 饶长辉. 一种自适应光学闭环系统预测控制算法的仿真研究 [J]. 光学学报, 2011, 31(1): 0101003.
- [9] Poyneer L, Véran J P. Predictive wavefront control for adaptive optics with arbitrary control loop delays [J]. Journal of the Optical Society of America A, 2008, 25(7): 1486-1896.
- [10] Yan Z J, Li X Y. Neural network prediction algorithm for control voltage of deformable mirror in adaptive optical system [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(4): 911-916.
颜召军, 李新阳. 基于神经网络的自适应光学系统变形镜控制电压预测方法 [J]. 光学学报, 2010, 30(4): 911-916.
- [11] Paschall R N, Anderson D J. Linear quadratic Gaussian control of a deformable mirror adaptive optics system with time-delayed measurements [J]. Applied Optics, 1993, 32(31): 6347-6358.
- [12] Looze D P, Kasper M, Hippler S, *et al.* Optimal compensation and implementation for adaptive optics systems[J]. Experimental Astronomy, 2003, 15(2): 67-88.
- [13] Looze D P. Structure of LQG controllers based on a hybrid adaptive optics system model [J]. European Journal of Control, 2011, 17(3): 237-248.
- [14] Looze D P. Linear-quadratic-Gaussian control for adaptive optics systems using a hybrid model [J]. Journal of the Optical Society of America A, 2009, 26(1): 1-9.
- [15] Le Roux B, Conan J M, Kulcsár C, *et al.* Optimal control law for classical and multiconjugate adaptive optics[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2004, 21(7): 1261-1276.
- [16] Fusco T, Conan J M, Michau V, Michau V, *et al.* Phase estimation for large field of view: application to multiconjugate adaptive optics [J]. Proceedings of SPIE, 1999, 3863: 125-133.
- [17] Conan J M, Rousset G, Madec P Y. Wave-front temporal spectra in high-resolution imaging through turbulence [J]. Journal of the Optical Society of America A, 1995, 12(7): 1559-1570.