

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2108440

# 基于嵌入式平台控制的变形镜面形展平研究

张悦<sup>1</sup> 陈欣扬<sup>2</sup> 王超燕<sup>2</sup> 卜朝晖<sup>1</sup>

(1.上海理工大学生物医学工程研究所 上海 200093; 2.中国科学院上海天文台 上海 200030)

**摘要:** 变形镜是自适应光学系统中最主要的波前矫正器,它可以通过高频地改变镜面的面形来实时补偿波前像差。由压电陶瓷驱动的变形镜在自由状态下并非理想的平坦表面。由这种初始面形误差所产生的光学畸变将严重削弱变形镜闭环控制的性能。在使用变形镜进行光学像差矫正之前,需要首先对变形镜进行镜面展平。拟设计一种基于嵌入式平台的变形镜控制系统来实现面形展平和镜面变形。嵌入式平台选用英伟达公司的 Jetson Nano 开发平台。面形展平的关键环节是需要精确地获得变形镜对每个促动器行程(电压)的光学响应(影响函数),进而计算出响应矩阵。我们设计了基于 Arm 多核处理器的多线程算法显著提高了响应矩阵的计算速率。受压电材料的迟滞效应影响,变形镜的展平过程需要进行迭代收敛。经过数次迭代后,变形镜的面形误差 RMS 值由初始时的  $0.92\lambda$  降低到  $0.03\lambda$ ,变形镜获得了比较好的展平效果。该系统的设计不但有利于变形镜系统的商用化,且较大程度地提高了变形镜闭环控制的能力,消除了自适应光学系统中变形镜自身的初始像差。

**关键词:** 自适应光学;变形镜;波前像差;Jetson Nano 开发板;响应矩阵

**中图分类号:** TN29 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.20

## Research on deformable mirror flattening based on embedded platform

Zhang Yue<sup>1</sup> Chen Xinyang<sup>2</sup> Wang Chaoyan<sup>2</sup> Bu Zhaohui<sup>1</sup>

(1. Institute of Biomedical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China)

**Abstract:** Deformable mirror (DM) is the most important wavefront corrector in adaptive optics. It can compensate wavefront aberration by changing the reflective mirror's surface frequently. However, the commercial piezoelectric deformable mirror can't obtain an ideal flat surface under the initial voltage. The optical aberration caused by this initial distortion will seriously weaken the performance of closed-loop control of deformable mirror. Therefore, it is necessary to flatten the surface of deformable mirror before using it for optical aberration correction. In the paper, a deformable mirror control system based on embedded platform is designed to realize surface flattening and mirror deformation. The embedded platform is Jetson Nano development board of NVIDIA company. In order to properly control the optical figure of the deformable mirror we have to obtain an response matrix which is the response of optical surface to the DM actuator's stroke. Here, the multithreading algorithm is used to improve the computing speed of the response matrix. Because of the hysteresis effect of compressed electrical materials, the flattening of deformable mirror needs to be carried out iteratively. After several close-loop iterations, the surface error RMS of the deformable mirror is reduced from  $0.92\lambda$  to  $0.03\lambda$ . The deformable mirror has a good flattening effect. The system is not only conducive to the commercialization of the deformable mirror system, but also greatly improves the closed-loop control ability of the deformable mirror and eliminates the initial aberration of the deformable mirror itself in the adaptive optical system.

**Keywords:** adaptive optics; deformable mirror; wavefront aberration; Jetson Nano development board; response matrix

## 0 引言

随着自适应光学的兴起,高分辨率光学成像在天文

学<sup>[1]</sup>、显微术<sup>[2]</sup>和眼科学<sup>[3-4]</sup>等领域的应用潜能逐渐被开发。自适应光学是一种非常重要的光学技术,用于实时补偿广泛存在于光学系统中的动态波前像差<sup>[5]</sup>。变形镜是自

适应光学中最主要的波前校正器,是通过频繁地改变镜面的面形来补偿相位畸变<sup>[6]</sup>。然而,由于薄镜面自身的刚性局限性和镜面背部压电陶瓷促动器支撑的限制,商用压电变形镜在自由状态下并非理想的平坦表面。这种初始畸变产生的光学像差将严重削弱变形镜闭环控制的性能。因此在使用变形镜矫正光学系统像差之前,首先需要对变形镜镜面本身进行面形标定。在某些应用场合中,变形镜也需要通过面形展平来实现其作为一种平面反射镜使用的用途<sup>[7-8]</sup>。

变形镜面形展平日前主要有两种方法。第1种是用干涉仪测量每个促动器相对于整体面形的高度差,然后驱动该促动器进行运动补偿,多次迭代后将差值减小到零<sup>[9]</sup>。第2种是测量变形镜对每个促动器运动的光学响应(影响函数),然后通过矩阵求逆获得控制电压与面形的映射关系,从而将干涉仪测量出的面形误差转化为补偿电压值,经多次迭代后实现展平。第1种方法因为省去了矩阵运算,所以展平速度较快,但对高阶像差的矫正能力较弱,限制了自适应光学性能。第2种方法基于影响函数测量,具有更好的像差矫正能力,但缺点是测量和运算过程耗时多。意大利的 Arcidiacono 等<sup>[10]</sup>在2015年使用第二种方法对 OKO PDM50-109 变形镜进行面形展平,并用 TriOptics  $\mu$ Phase500 干涉仪测量变形镜面形。该干涉仪能产生直径 10 mm 的准直光束,而变形镜的通光孔径为 50 mm,因此需要引入一套扩束透镜来匹配校准。2020年,中国科学院上海天文台的陈欣扬等科研人员采用 ZYGO-GPI 干涉仪来测量变形镜的面形,并通过计算机计算响应矩阵和控制变形镜形变<sup>[11]</sup>。ZYGO-GPI 干涉仪可以产生 150 mm 的准直光束,因此不再需要扩束透镜。

本文采用第2种方法对 OKO PDM50-109 变形镜面形进行平面校准。利用 ZYGO-GPI 干涉仪测量变形镜面形,并依托英伟达(NVIDIA)的 Jetson Nano 嵌入式开发板实现了基于 Arm 多核处理器和 Linux 操作系统的变形镜面形实时控制和基于多线程算法的响应矩阵快速运算。相比于传统的用计算机控制变形镜方式,嵌入式系统实现了控制设备的小型化,算法效率得到显著提高,不仅更有利于变形镜应用系统商用化,而且在一定程度上弥补了第2种展平方法的缺点。

## 1 变形镜展平方法

图1所示为变形镜面形展平的过程,主要有4个步骤。

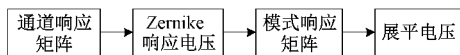


图1 变形镜展平流程

### 1.1 计算通道响应矩阵

对变形镜促动器逐个先后施加 + $v$  和 - $v$  的电压值,并用 ZYGO-GPI 干涉仪测量相应的变形镜波前。 $v$  是通道控制电压归一化后的数值,取值范围  $[-1, +1]$ 。设与第

$i$  个促动器运动所对应的变形镜波前分别为  $WF_{i,v}$  和  $WF_{i,-v}$ , 每个促动器的影响函数表示为:

$$V_2 F_i = (WF_{i,v} - WF_{i,-v}) / (2 \times v) \quad (1)$$

变形镜共有 109 个促动器。在测量出所有促动器的影响函数后,这 109 组数据向量将组合成该变形镜的通道响应矩阵  $V_2 F$ , 即:

$$V_2 F = [V_2 F_1, V_2 F_2, \dots, V_2 F_{109}] \quad (2)$$

变形镜的任意面形可以视作以各通道控制电压为权重的促动器影响函数的线性组合,按矩阵方式可表示为通道响应矩阵和通道控制电压向量的乘积,即:

$$WF = V_2 F \times V \quad (3)$$

式中:  $V = [V_1, V_2, \dots, V_{109}]$ , 对应 109 个通道的控制电压值。

### 1.2 计算 Zernike 响应电压

任意完整的波前都可以分解为一组 Zernike 正交多项式的线性组合<sup>[12]</sup>, 即:

$$WF = \sum_{j=1}^{\infty} a_j Z_j \quad (4)$$

该多项式序列包含了平移( $j=1$ )、倾斜( $j=2,3$ )、离焦( $j=4$ )、像散( $j=5,6$ )等不同阶数项<sup>[13]</sup>。假设基于第  $j$  项泽尼克多项式的归一化波前为  $WF_{zmk,j}$ , 则理论上的泽尼克多项式响应电压向量为:

$$V_{zmk,j} = F_2 V \times WF_{zmk,j} \quad (5)$$

式中:控制矩阵  $F_2 V$  是通道响应矩阵  $V_2 F$  的广义逆阵,可通过奇异值分解(singular value decomposition, SVD)求出。

### 1.3 计算模式响应矩阵

根据式(5),求出与前 100 项泽尼克多项式归一化波前相对应的 100 组响应电压向量。逐项先后施加 + $V_{zmk,j}$  和 - $V_{zmk,j}$  至变形镜促动器,并用 ZYGO-GPI 干涉仪测量相应的变形镜实际波前  $WF_{zmk,j}^+$  和  $WF_{zmk,j}^-$ 。各项泽尼克多项式的影响函数表示为:

$$V_2 F_{zmk,j} = (WF_{zmk,j}^+ - WF_{zmk,j}^-) / 2 \quad (6)$$

这 100 组数据向量组合成矩阵  $WF_{zmk}$ , 可得到变形镜的模式响应矩阵  $V_2 F'$ :

$$V_2 F' = [V_2 F_{zmk,1}, V_2 F_{zmk,2}, \dots, V_2 F_{zmk,100}] \quad (7)$$

变形镜的通道响应矩阵  $V_2 F$  是基于所有单通道电压施加后的面形响应测量,包含了变形镜边缘位置的促动器因边界截断而可能引起的响应不均匀性,或是造成局部面形过于陡峭引起干涉仪波前测量拟合数据的缺失。相比较而言,模式响应矩阵  $V_2 F'$  能够更精确、更完整地反映变形镜面形对于促动器控制电压的响应能力。进一步得到新的变形镜控制矩阵  $F_2 V'$ :

$$F_2 V' = V_{zmk} \times V_2 F'^{-1} \quad (8)$$

### 1.4 计算展平电压

压电材料通常具有迟滞效应<sup>[14]</sup>。压电材料的迟滞效应不仅与当前时刻的输入电压和输出位移有关,还与之前

输入的历史有关<sup>[15-16]</sup>。为了克服迟滞效应对变形镜的影响,变形镜展平通常需要迭代进行。给所有的促动器施加  $v = 0$  的电压值,以此时测量的波前  $WF_1$  作为开始迭代的初始波前。第  $k+1$  次迭代展平的通道控制电压值可表示为:

$$V_{k+1} = V_k + F_2 V' \times (-WF_k) \quad (9)$$

式中:  $WF_k$  为向变形镜施加第  $k$  次迭代展平后,干涉仪所测量的变形镜波前。直到变形镜面形误差的均方根(root mean square, RMS)和峰谷值(peak to valley, PV)趋于收敛,迭代过程结束。最后一次迭代的通道控制电压即为变形镜的最终展平电压。

## 2 硬件设计

### 2.1 变形镜控制电路

变形镜控制示意图如图 2 所示。Jetson Nano 开发板是控

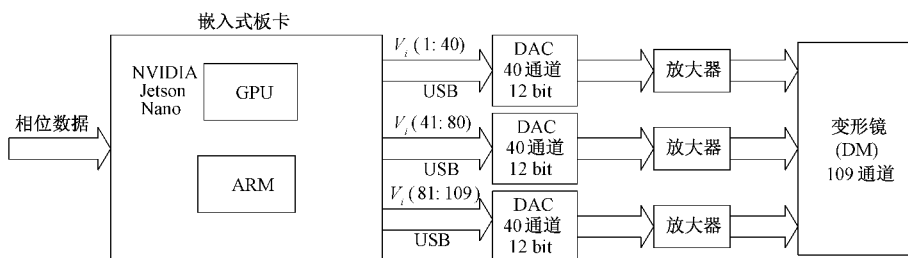


图 2 变形镜控制示意图

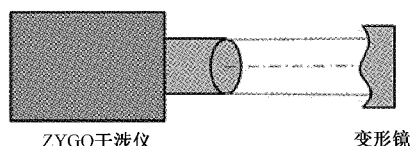


图 3 测量装置示意图

ZYGO-GPI 干涉仪配备了一个标准镜头,可以产生直径为 150 mm 的高质量准直光束。而 PDM50-109 变形镜的通光口径为 50 mm,其最优矫正口径为 40 mm<sup>[17]</sup>,通过放置光阑调整孔径尺寸。变形镜固定在一个三维调整架上,可实现与光轴正交以及中心重合的自由度调节。

压电式变形镜由薄镜面、压电陶瓷促动器和二氧化硅或硅制成的薄基板构成,镜面材料取决于具体应用场景。压电促动器基于压电陶瓷材料的逆压电效应,通过施加电场使材料在轴向或径向产生伸缩,进而推拉反射薄镜面实现变形。每个促动器的行程不仅决定于施加力,还有促动器、反射镜的刚性。

PDM50-109 变形镜的实物图如图 4(a)所示。PDM50-109 变形镜背面共有 109 个压电促动器,排布如图 4(b)所示。每个促动器在电压为 400 V 时,最大行程为 8  $\mu\text{m}$ ,电压为 300 V 时,最大行程为 6  $\mu\text{m}$ 。相邻促动器间隔为 4.3 mm。

## 3 软件设计

测量软件由变形镜控制模块、通道响应矩阵计算模

制系统的核心。该开发板的 CPU 采用了四核的 ARM<sup>®</sup> A57 处理器。首先输入干涉仪测量的波前数字信号,通过信号处理程序处理后生成展平电压值,再由数字模拟转换器(digital to analog converter, DAC)电路将数字量转化为模拟量。DAC 芯片采用 ADI 公司的 AD5381。该芯片具有 12 bit 分辨率和 40 个通道数。由于变形镜共有 109 个通道,因此需要 3 片 AD5381。开发板和 DAC 电路之间通过 FTDI 公司的通用串行总线(universal serial bus, USB)接口芯片 FT245BM 实现 USB 通信。经过标定后的 DAC 输出电压满量程值为 3.65 V。最后通过电压放大器获得驱动变形镜压电促动器的驱动控制电压。每个放大器的增益为 81,通道数为 40,输出的最大行程电压约为 300 V。

### 2.2 测量装置

变形镜面形的测量装置如图 3 所示。

块、泽尼克多项式响应电压计算模块、变形镜控制矩阵计算模块以及展平电压计算模块构成。Jetson Nano 开发板的操作系统为 Ubuntu 18.04,软件编程语言为 C++,基于 Qt5.9.5 程序开发框架开发。

### 3.1 变形镜控制

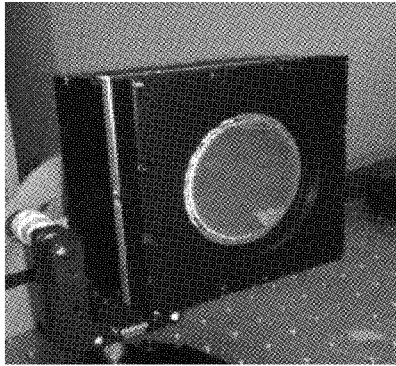
变形镜控制的过程如图 5 所示。程序对变形镜的控制指令是通过向 DAC 控制盒的 USB 端口发送电平数据包来实现。数据包大小为 129 字节,由 1 个起始字节和 8 个 16 字节的数据段组成。

### 3.2 计算通道响应矩阵

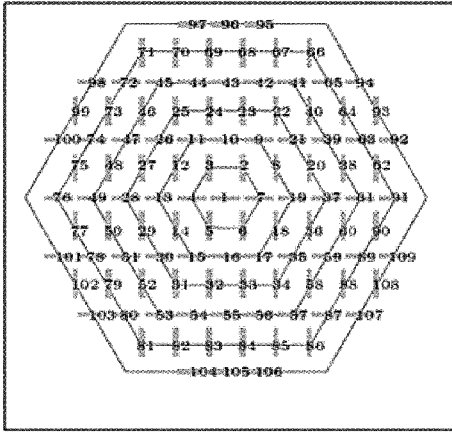
通道响应矩阵的计算流程如图 6 所示。由于各通道响应矩阵  $V_2 F_i$  的计算是相互独立的,因此考虑通过并行运算来提高计算速率。运算采用多线程方式。Jetson Nano 开发板的 CPU 共有 4 核,即同一时刻可以有 4 个线程同时进行。除 1 核用于执行主线程外,其余 3 核用于矩阵运算。因为变形镜具有 109 通道,所以响应矩阵  $V_2 F_i$  数为 109,在不调用多线程计算时,需要循环 109 次才能得到响应矩阵  $V_2 F$ 。而调用多线程后,同一时刻可以同时计算三个响应矩阵,即需要的循环次数降到 37 次,大大降低了程序运行时长。其中,矩阵求逆运算调用了计算机视觉函数库 OpenCV 的 invert() 函数。

### 3.3 计算泽尼克响应电压和变形镜控制矩阵

泽尼克响应电压的计算如式(4)~(5)所示。计算泽尼克响应电压也采用多线程方式来提高运算速率。因为



(a) PDM50-109变形镜实物图



(b) 109通道变形镜促动器的几何分布

图4 OKO PDM50-109 变形镜

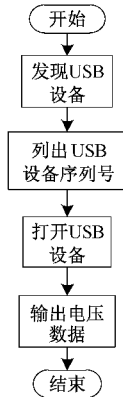


图5 变形镜控制流程

需要计算前 100 阶泽尼克多项式的响应电压,所以  $V_{zmk, j}$  有 100 个,因此在不调用多线程计算时,需要循环 100 次,在调用多线程运算后,循环次数降为 34 次。

模式响应矩阵的计算同样也采取多线程运算方式。将 1~100 阶泽尼克多项式响应电压逐阶施加到变形镜,由式(6)~(7)可得到模式响应矩阵,再根据式(8)可计算出变形镜控制矩阵。

### 3.4 计算展平电压

根据式(9)计算变形镜的通道控制电压值  $V_i$ , 并反复

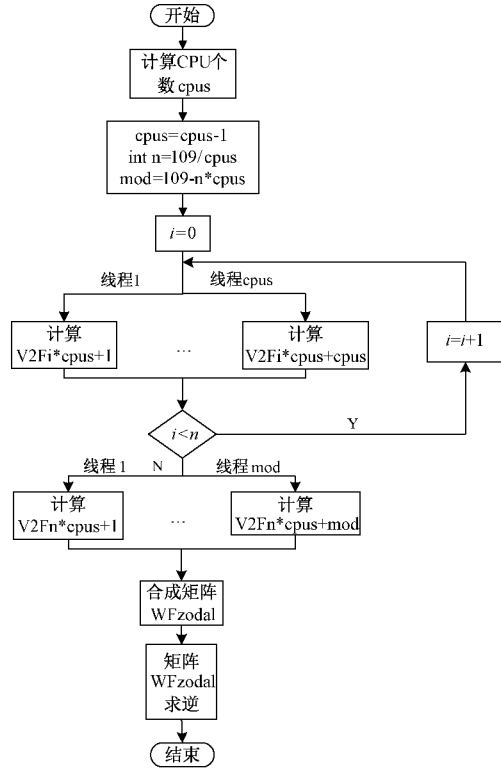


图6 通道响应矩阵的计算流程

迭代。当变形镜面形误差趋于稳定收敛时,迭代过程结束。最后一次迭代的通道控制电压即为变形镜的最终展平电压。实验结果表明迭代次数约在 9~11 次。

## 4 实验结果与分析

本文按照第 1 节所阐述的变形镜展平方法,搭建如图 3 所示的实验装置,通过基于 Jetson Nano 开发板设计的软硬件平台,根据如图 1 所示的变形镜展平流程,开展变形镜面形展平实验,测量变形镜最终展平后的面形精度、展平消耗时间以及展平电压值的重复性精度。

在变形镜展平流程中的通道响应矩阵测量环节,变形镜促动器施加电压  $v$  的归一化值取 0.7;在泽尼克多项式响应电压计算环节,泽尼克多项式中每一分量的系数值均取 1 个波长(0.633  $\mu\text{m}$ )。

### 4.1 面形展平结果

图 7 是用 ZYGO-GPI 干涉仪测量的变形镜面形展平前、后的干涉图与重构的面形图。从图 7 中可以看出,展平之前的条纹是弯曲且没有规律;展平之后的条纹近似是相互平行且为直线状。展平之前的面形图整体起伏较大;展平之后的面形图整体基本平坦。进一步比较变形镜展平前后的波前误差可以发现,OKO PDM50-109 变形镜的面形误差 RMS 从初始的 0.919 $\lambda$  降低到 0.034 $\lambda$ ,PV 从初始的 5.824 $\lambda$  降低到 0.410 $\lambda$ (ZYGO-GPI 干涉仪光源波长  $\lambda$  为 632.8 nm),因此面形得到了非常显著的展平。通过观察图 7(d)可知,变形镜的边缘部分的残差较大,这可能



是由于在测量变形镜面过程中某些面形图的边缘数据缺失造成一些边缘位置的促动器影响函数偏差所导致的。

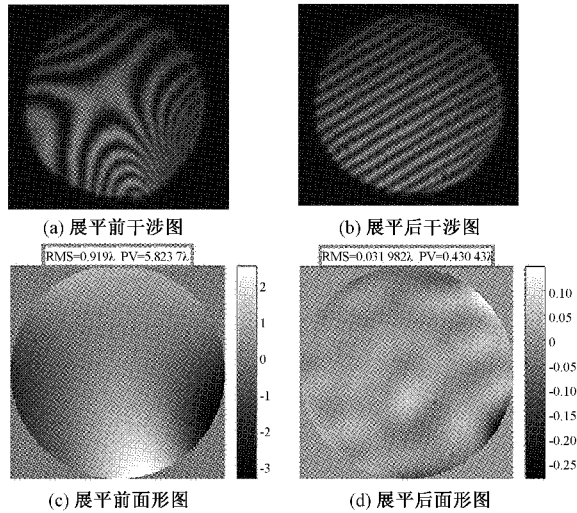


图 7 ZYGO-GPI 干涉仪测量的变形镜展平前、后的干涉图与面形图

根据泽尼克多项式对变形镜面形展平前、后的波像差进行模式分解。表 1 是前 10 项泽尼克系数值的对比。可以看出,展平后的各阶像差几乎都明显小于展平前的像差;变形镜初始状态下的最主要像差是 0°像散,这一点和图 7(c)上波面呈马鞍形状分布的特征是完全吻合的。

表 1 变形镜面形展平前、后的波前像差各阶系数值

$j$	像差项	展平前系数( $\lambda$ )	展平后系数( $\lambda$ )
2	X 方向倾斜	0.001 337	0.000 112
3	Y 方向倾斜	-0.015 517	-0.000 682
4	离焦	-0.322 783	-0.010 766
5	45°像散	-0.003 855	0.028 348
6	0°像散	-1.876 823	0.023 832
7	Y 轴彗差	0.441 176	0.007 918
8	X 轴彗差	-0.146 019	-0.000 810
9	X 轴三叶草	0.948 431	0.017 229
10	Y 轴三叶草	-0.379 398	0.005 746
11	球差	0.075 794	-0.003 947

图 8 反映了变形镜迭代展平过程中的面形误差变化。随着迭代次数的增加,变形镜的面形误差 RMS 值和 PV 值均不断减小,趋于收敛。从图 8 中可以看出,第 4 次迭代之前曲线下落的速率比较快,第 4 次迭代之后曲线的下降速率逐渐变慢,直至最后趋于稳定。

#### 4.2 算法耗时对比

表 2 为分别在 PC 机上执行单线程算法和在嵌入式平台上执行多线程算法所用时间的对比。PC 机的处理器是 Intel(R) Core(TM) i5-8250U CPU@1.60 GHz 1.80 GHz,内存为 8 G,64 位操作系统。Jetson Nano 的处理器为

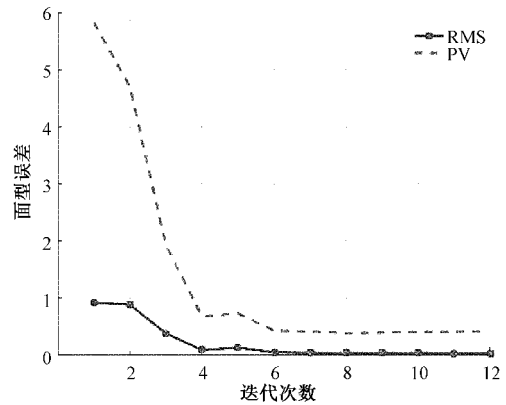


图 8 变形镜迭代展平过程中的面形误差变化

ARM® A57@1.43 GHz,内存为 4 G,64 位操作系统。通过对比发现,基于嵌入式平台的多线程算法计算时间明显少于基于 PC 机的单线程算法计算时间。证明基于嵌入式平台的多线程算法在提升运算速率方面具有显著的优势。

表 2 不同平台十算法的时间消耗对比

步骤	基于 PC 机的单线程计算/s	基于嵌入式平台的多线程计算/s
计算通道响应矩阵+泽尼克多项式响应电压	232.63	82.03
计算模式响应矩阵	174.25	50.33

#### 4.3 展平电压重复性比较

在实验装置状态保持不变的情况下,进行了多次变形镜展平实验,获得多组展平电压值。计算每个通道的展平电压标准差,其直方图分布情况如图 9 所示。由于受环境(温度、气流、振动等)对测量实验的影响,每个通道上的展平电压数据在重复性方面不可避免地存在误差。从图 9 中可以看出,所有通道上的展平电压值(归一化)的标准差基本分布在 0~0.15 的区间内,其中位于 0.05~0.1 之间的通道数最多。说明展平电压的重复性精度也是比较高的。

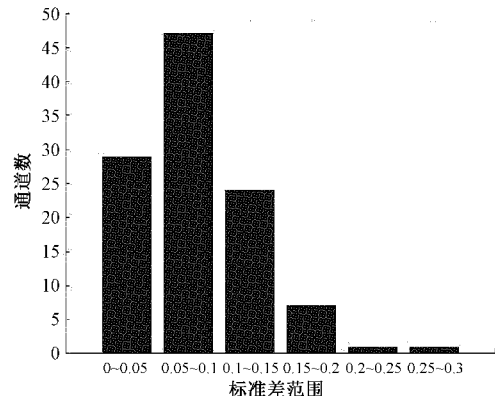


图 9 变形镜各通道展平电压标准差的分布直方图

## 5 结 论

利用 ZYGO-GPI 干涉仪和基于 Arm 多核处理器的 Jetson Nano 开发平台作为变形镜展平的测量与控制核心,通过快速测量和运算,获得模式响应矩阵,最终实现了 OKO PDM50-109 变形镜的展平标定。相对于展平前的初始面形,展平后的变形镜的面形误差 RMS 值减少了约 28 倍,PV 值减少了约 13 倍。变形镜由此获得了一个比较好的展平效果。本文的研究不但有利于变形镜系统的商用化,且较大程度地提高了变形镜闭环控制的能力,消除了自适应光学系统中变形镜自身的初始像差。另外,在干涉仪测量变形镜面形过程中,会出现因环境扰动或边缘位置上的促动器行程过大促动引起局部面形陡峭,造成干涉仪测量的一些面形图上的孔径局部边缘数据出现缺失,从而导致变形镜局部边缘位置的面形误差很难矫正。因此,将来可以研究利用一些曲面插补算法来修正面型图,从而获得更理想,更全面的展平效果。

## 参考文献

- [1] ROUSSET G, FONTANELLA J C, KERN P, et al. First diffraction-limited astronomical images with adaptive optics [J]. *Astronomy and Astrophysics*, 1990, 230(2): L29-L32.
- [2] NEIL M A, JUSKAITIS R, BOOTH M J, et al. Adaptive aberration correction in a two-photon microscope[J]. *Journal of microscopy*, 2000, 200(2): 105-108.
- [3] LIANG J, WILLIAMS D R, MILLER D T. Supernormal vision and high-resolution retinal imaging through adaptive optics[J]. *JOSA A*, 1997, 14(11): 2884-2892.
- [4] BRUNNER E, SHATOKHINA J, SHIRAZI M F, et al. Adaptive optics imaging with a pyramid wavefront sensor for visual science [J]. *Biomedical Optics Express*, 2021, 12(10): 5969-5990.
- [5] 谭振坤, 柯熙政, 王姣. 外差探测系统波前校正实验研究[J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(12): 121-127.
- [6] 樊凡, 孟晓晨, 娄小平, 等. 基于可变形镜的稳像方法研究[J]. *电子测量技术*, 2019, 42(7): 63-67.
- [7] VDOVIN G, SOLOVIEV O, SAMOKHIN A, et al. Correction of low order aberrations using continuous deformable mirrors[J]. *Optics express*, 2008, 16(5): 2859-2866.
- [8] VAN DAM M A, MIGNANT D L, MACINTOSH B A. Performance of the keck observatory adaptive-optics system [J]. *Applied Optics*, 2004, 43 (29): 5458-5467.
- [9] 林旭东, 刘欣悦, 王建立, 等. 基于干涉仪测量的变形镜面形展平标定研究[J]. *光子学报*, 2012, 41(5): 511-515.
- [10] ARCIDIACONO C, CHEN X, YAN Z, et al. Sparse aperture differential piston measurements using the pyramid wave-front sensor [C]. *Proc. SPIE*, 2016, 9909: 99096K-1-10.
- [11] CHEN X, WANG C, ZHENG L, et al. Measurement of interactive matrix and flat-surface calibration of OKO 109-channel deformable mirror using ZYGO-GPI interferometer [C]. *Proc. SPIE*, 2020, 11552: 115521Y-1-4.
- [12] 黄宇飞, 白绍竣, 高冀, 等. 大口径空间光学反射镜面形动力学响应分析[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(11): 181-186.
- [13] RODDIER F. *Adaptive optics in astronomy* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1999: 26-29.
- [14] SINQUIN J C, LURCON J M, GUILLEMARD C. Deformable mirror technologies for astronomy at CILAS[C]. *Proc. SPIE*, 2008, DOI:10.1117/12.787400.
- [15] 王栋, 于鹏, 周磊, 等. 基于梯形算子的 AFM 驱动器非对称迟滞性校正[J]. *仪器仪表学报*, 2015, 36(1): 32-39.
- [16] 陈俊, 徐志伟, 陈杰. 压电驱动器驱动电源设计[J]. *国外电子测量技术*, 2014, 33(4): 48-53.
- [17] VDOVIN G, LOVIEW O, LOKTEV M, et al. OKO guide to adaptive optics[M]. Delft: Flexible Optical BV(OKO Technologies), 2013: 23-25.

## 作者简介

张悦, 硕士研究生, 主要研究方向为生物医学信号处理。

E-mail: zhang596819910@126.com

陈欣扬, 高级工程师, 主要研究方向为光学天文仪器的控制技术。

E-mail: xychen@shao.ac.cn

王超燕, 高级工程师, 主要研究方向为天文光学检测与调校。

E-mail: superyan@shao.ac.cn

卜朝晖(通信作者), 副教授, 主要研究方向为生物医学信号处理。

E-mail: buzhu@usst.edu.cn