

# 一种使用多核CPU的相关哈特曼-夏克波前处理机

陈冰倩<sup>1,2</sup> 何杰铃<sup>1,2</sup> 王彩霞<sup>1</sup> 魏 凌<sup>1</sup>

<sup>1</sup>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

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 斜率算法对哈特曼-夏克传感器非常重要,而基于归一化互相关斜率算法的哈特曼-夏克传感器可满足强噪声情况下点光源和扩展目标的斜率探测需求。为解决互相关斜率处理器可移植性差的问题,提出用多核中央处理器(CPU)来实现斜率探测。在优化归一化互相关算法的基础上,编程实现斜率探测,并从多核并行和运算向量化两方面优化程序,提升斜率提取速度。当模板分辨率为9 pixel×9 pixel时,优化程序在Intel(R) Core(TM) i7-3770k四核计算机上运行,完成400个15 pixel×15 pixel的子孔径斜率提取,用时约为340 μs。搭建了自适应光学系统,对优化后的斜率算法进行系统闭环测试。结果表明,使用多核CPU的相关哈特曼-夏克自适应光学系统能在强噪声环境下进行有效的波前校正。

**关键词** 自适应光学;波前传感;多核中央处理器;目标跟踪;归一化互相关;波前斜率探测

中图分类号 TP751.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0312001

## A Correlating Hartmann-Shack Wavefront Processor Using Multi-Core CPU

Chen Bingqian<sup>1,2</sup> He Jieling<sup>1,2</sup> Wang Caixia<sup>1</sup> Wei Ling<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Adaptive Optics, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** Gradient algorithm is very important for the Hartmann-Shack sensor. The Hartmann-Shack sensor based on the normalized cross correlation (NCC) gradient algorithm shows strong noise immunity. In addition, it can detect both point source and extended target. A multi-core central processing unit (CPU) is used to implement NCC gradient algorithm to get better portability compared to the existing processor. The NCC algorithm is optimized and programmed. The program is improved by multi-core parallelization and advanced vector extension. When the template resolution is 9 pixel×9 pixel, the optimized program running on a 4-core computer, Intel (TM) Core (R) i7-3770k, spends about 340 μs to calculate the slope of 400 sub-apertures with 15 pixel×15 pixel. An adaptive optics system using optimized gradient program is built and experiences closed-loop test. The experimental results show that the CPU-based Hartmann-Shack adaptive optics system using NCC gradient algorithm can correct wavefront distortions effectively, even in strong noise environment.

**Key words** adaptive optics; wavefront sensing; multi-core central processing unit; target tracking; normalized cross correlation; wavefront gradient detection

**OCIS codes** 010.7350; 100.4999; 010.1080

## 1 引 言

自适应光学(AO)系统以克服大气湍流对望远镜成像的干扰为主要目的而发展迅速<sup>[1]</sup>,广泛应用于人眼

收稿日期: 2015-10-26; 收到修改稿日期: 2015-11-05

基金项目: 国家自然科学基金(61108082)、国家重大科学仪器设备开发专项(2012YQ120080)

作者简介: 陈冰倩(1991—),女,硕士研究生,主要从事高速、大容量图像数据处理等方面的研究。

E-mail: bingqian\_chen@163.com

导师简介: 王彩霞(1979—),女,博士,副研究员,主要从事自适应光学信号信息处理等方面的研究。

E-mail: wxioe@hotmail.com

视网膜成像、激光光束质量改善等多个领域<sup>[2-3]</sup>。哈特曼-夏克(HS)传感器是自适应光学系统中常用的一种波前探测器<sup>[4]</sup>,具有结构简单且光能利用率高等优点。

斜率处理是基于哈特曼-夏克传感器的 AO 系统的关键步骤<sup>[5]</sup>,常用现场可编程门阵列(FPGA)、数字信号处理技术(DSP)和图形处理器(GPU)实现<sup>[6-10]</sup>。基于 FPGA 和 DSP 专用芯片架构的斜率处理方式的处理平台需要定制<sup>[7-9]</sup>,导致其开发周期长,而且依据摩尔定律,随着芯片的快速升级换代,也会给系统的后期维护带来一定的风险。GPU 具有强大的数据处理能力,但作为协处理器<sup>[10]</sup>,与中央处理器(CPU)的通信会带来附加延迟,导致系统性能降低。近年来,随着计算机技术的发展<sup>[11]</sup>,CPU 的数据处理能力有了大幅提高。与专用定制平台相比,商用多核 CPU 采用标准化配置,更易于后期维护,可有效降低维护成本。而且通用 CPU 平台处理方案可以实现代码重用,方便移植,可有效缩短波前处理机的开发周期。除此之外,一台计算机可同时实现波前任务的处理和系统性能的监控,简化了系统规模,也降低了系统的开发成本,特别适合中小型自适应光学的处理方案。

使用 CPU 完成 AO 系统实时数据处理得到了国内外研究的广泛关注<sup>[12-15]</sup>。国内已在多核 CPU 上实现了质心算法和绝对差分算法的波前探测<sup>[15-16]</sup>;美国的 NST (New Solar Telescope)系统采用 CPU 完成了基于绝对差分算法的波前处理<sup>[13]</sup>;德国太阳望远镜中的 KAOS (Kiepenheuer-Institute Adaptive Optics System)系统采用八核计算机实现了非归一化的互相关斜率计算<sup>[14]</sup>。

质心算法<sup>[17-18]</sup>、绝对差分算法<sup>[13-16]</sup>和互相关算法<sup>[19]</sup>都是常用的波前斜率计算方法。质心算法简单易实现,但它只适用于点光源这种对称性目标的斜率探测<sup>[20]</sup>,而且抗噪性能差,只能在目标灰度值高、背景灰度值低的情况下保证检测效果。绝对差分算法和互相关算法都可用于扩展目标的斜率探测,且抗噪能力强。但互相关算法在光强分布不均匀时,具有比绝对差分算法更好的探测性能。特别是基于归一化的互相关算法(NCC),对图像灰度值线性变化不敏感,计算结果固定在 $[-1,1]$ 范围内,容易设置检测阈值<sup>[21]</sup>,在斜率处理中有较强的优势。

由于 NCC 算法的斜率提取运算量大,本文先优化 NCC 算法以减少运算量,再编程实现算法,并用 OpenMP 多核并行语句和 AVX 向量化语句优化斜率处理程序,进一步提升运行速度,测试不同优化条件下的程序运行时间,确定优化方案。最后搭建哈特曼-夏克 AO 系统,并应用优化后的程序进行斜率处理,实现系统闭环,验证了使用多核 CPU 的相关哈特曼-夏克 AO 系统在强噪声环境下能进行有效的波前畸变校正。

## 2 系统介绍

### 2.1 自适应光学系统的结构

自适应光学系统主要由波前探测器、波前处理机和波前校正器三部分组成,目的是实时校正由大气湍流等外界干扰引起的目标光波前畸变。波前探测器探测到的畸变波前,通过波前处理机的计算产生波前校正器控制信号,并送入波前校正器以补偿畸变的波前,其原理如图 1 所示。

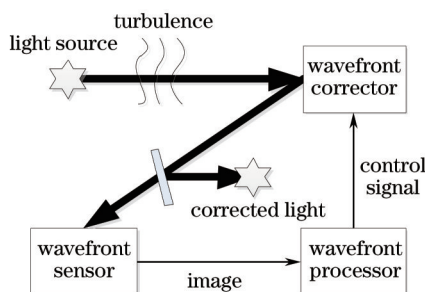


图 1 自适应光学系统原理图

Fig.1 Sketch map of adaptive optics system

哈特曼-夏克传感器是一种常用的波前探测器,由微透镜阵列和 CCD 相机两部分组成,工作原理如图 2 所示。发生畸变的目标光通过微透镜阵列,聚焦到 CCD 感光面上形成多个子孔径光斑。由于波前相差的存在,子孔径光斑会在相对标定位置产生横纵两个方向上的偏移。在该 AO 系统中,波前处理机需要根据 CCD

采集的图像进行光斑定位,计算光斑偏移量获得局部斜率,进而控制波前校正器进行波前校正。

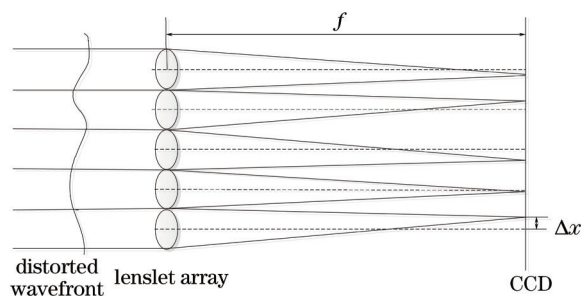


图2 哈特曼-夏克传感器原理图

Fig.2 Sketch map of Hartmann-Shack wavefront sensor

## 2.2 互相关波前处理机

与基于其他斜率算法的哈特曼-夏克波前处理机一样,相关波前处理机的主要任务是进行波前斜率提取、复原运算和控制运算,其运算量主要集中在前两项。而互相关算法计算量大的特点又使波前斜率提取成为了相关波前处理机中耗时最长的任务。

### 2.2.1 互相关波前斜率提取

图3所示为互相关匹配的示意图,图3(a)是分辨率为  $H \text{ pixel} \times W \text{ pixel}$  的子孔径图像,图3(b)是分辨率为  $M \text{ pixel} \times N \text{ pixel}$  的模板图像,一般要求  $M \leq H, N \leq W$ 。互相关斜率探测的具体方法是选取图像模板,将模板在子孔径内滑动,并与各个位置的子图像进行相关运算,求得相关函数值  $C(u, v)$ ,用相关值最大的点  $(u_0, v_0)$  及其4个邻域值进行二次插值以获得亚像素精度的光斑中心,最后根据光斑中心位置与标定光斑的坐标求出光斑中心的偏移量。互相关运算公式为

$$C(u, v) = \frac{\sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} I_L(i+u, j+v) I_R(i, j)}{\left[ \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} I_L^2(i+u, j+v) \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} I_R^2(i, j) \right]^{1/2}}, \quad 0 \leq u \leq H-M, \quad 0 \leq v \leq W-N, \quad (1)$$

式中  $C(u, v)$  是左上角顶点坐标为  $(u, v)$  的子图像与模板进行互相关运算得到的函数值,  $M, N$  为模板大小,  $I_R(i, j)$  为模板图像在坐标  $(i, j)$  处的灰度值,  $I_L(i+u, j+v)$  为相应位置上的子孔径图像灰度值。亚像素精度光斑位置获取公式为

$$x = u_0 + \frac{1}{2} \frac{C(u_0+1, v_0) - C(u_0-1, v_0)}{C(u_0-1, v_0) + C(u_0+1, v_0) - 2C(u_0, v_0)}, \quad (2)$$

$$y = v_0 + \frac{1}{2} \frac{C(u_0, v_0+1) - C(u_0, v_0-1)}{C(u_0, v_0+1) + C(u_0, v_0-1) - 2C(u_0, v_0)}, \quad (3)$$

式中  $(u_0, v_0)$  为相关值最大点的坐标,  $x, y$  分别为插值结果的横纵坐标。

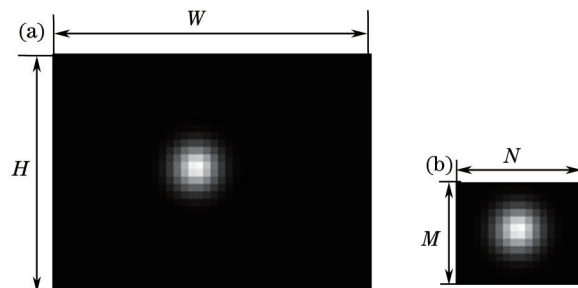


图3 NCC匹配示意图。(a)子孔径图像;(b)模板图像

Fig.3 Sketch map of NCC matching. (a) Sub-aperture image; (b) reference template

### 2.2.2 复原计算

复原计算是将斜率计算得到的子孔径光斑偏移量转化为波前相位误差,其实质是矩阵向量的乘积运算,矩阵形式的计算公式为

$$\mathbf{E} = \mathbf{M} \cdot \mathbf{G}, \quad (4)$$

设变形镜控制单元的个数为  $A$ , 子孔径数为  $B$  时,  $\mathbf{G}$  是由斜率计算产生的  $2B$  维向量, 包括每个子孔径  $x, y$  两个方向上的斜率,  $\mathbf{M}$  是复原矩阵, 由子孔径的排布及变形镜驱动器的各种参数事先计算得到, 复原结果  $\mathbf{E}$  是  $A$  维误差向量。

### 2.2.3 计算量分析

根据(1)式可知, 完成一帧具有  $B$  个子孔径数的图像斜率提取需要进行约  $3B \times (M \times N)(H-M)(W-N)$  次加法运算和同量级乘法运算。

根据(4)式可知, 完成复原运算需要进行约  $2AB$  次加法运算和同量级乘法运算。

当子孔径分辨率为  $15 \text{ pixel} \times 15 \text{ pixel}$ , 模板分辨率为  $9 \text{ pixel} \times 9 \text{ pixel}$  时, 完成 400 个子孔径的图像斜率处理需乘法和加法运算各约  $5 \times 10^6$  次。当子孔径数目相同时, 完成 35 个变形镜单元的复原运算需要乘法和加法运算各约  $3 \times 10^4$  次。由此可以看出, 互相关斜率探测的计算量远远大于复原运算, 因此主要针对互相关斜率探测部分进行优化研究。

## 3 算法优化及实现

### 3.1 互相关算法优化

从(1)式可以看出, 模板与子孔径进行运算可分为模板灰度值的平方和计算  $\sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} I_r^2(i, j)$ , 孔径内子图像像素的平方和计算  $\sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} I_L^2(i+u, j+v)$ , 以及两图像对应位置的乘积和计算  $\sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} I_L(i+u, j+v) I_R(i, j)$ 。由于对同一帧 CCD 图像不同子孔径进行斜率提取时采用的模板是统一的, 只需进行一次模板灰度值的平方和计算。但随着模板在子孔径范围内滑动, 子图像的平方和必须进行多次计算。而各个子图像有大量的像素点是重合的, 对这些点的灰度值进行反复平方及求和运算, 造成了大量的计算冗余。由此, 考虑使用 Lewis 提出的加和表快速归一化互相关算法<sup>[22-23]</sup>, 对相关斜率算法进行优化, 减少运算量。该算法的基本思想是用表  $S_1$  存储整个图像从起点像素开始的累计平方和, 再用  $S_1$  计算子图像的平方和  $S_2$ , 具体方法为

$$S_1(i, j) = I^2(i-1, j-1) + S_1(i-1, j) + S_1(i, j-1) - S_1(i-1, j-1), \quad (5)$$

$$S_2(u, v) = S_1(u+M, v+N) - S_1(u+M, v) - S_1(u, v+N) + S_1(u, v), \quad (6)$$

式中  $S_1(i, j)$  为整体图像从起点像素开始到坐标  $(i, j)$  的像素为止的灰度值累计平方和,  $I(i, j)$  为坐标  $(i, j)$  处的像素灰度值, 当  $i=0$  或  $j=0$  时,  $S_1(i, j) = 0$ 。  $M, N$  为模板的高和宽,  $S_2(u, v)$  即为坐标  $(u, v)$  处的子图像像素的平方和  $\sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} I_L^2(i+u, j+v)$ 。

算法优化前, 完成尺寸为  $M \times N$  模板图像与尺寸为  $H \times W$  子孔径图像的相关运算, 子图像像素平方和部分的运算量为: 乘法运算  $M \times N \times (H-M+1) \times (W-N+1)$  次, 加法运算  $(M \times N - 1) \times (H-M+1) \times (W-N+1)$  次。优化后, 运算量有效减少为: 乘法  $3 \times H \times W$  次, 加法  $3 \times (H-M+1) \times (W-N+1)$  次。当模板尺寸增大时, 优化效果更加明显。以分辨率为  $15 \text{ pixel} \times 15 \text{ pixel}$  的子孔径与分辨率为  $9 \text{ pixel} \times 9 \text{ pixel}$  的模板为例, 对单个子孔径做互相关运算, 优化前需要做加法 3920 次、乘法 3969 次, 优化后只需做加法 147 次、乘法 675 次。

### 3.2 互相关斜率算法的实现

用串行程序实现互相关斜率算法时, 计算时间长且 CPU 利用率低。为了满足系统高实时性的要求, 采用多核并行技术和运算向量化技术优化串行程序。

多核并行时, 可根据并行方式的不同, 分为垂直处理和水平处理两种策略<sup>[12]</sup>。其中垂直处理策略将程序分为若干任务, 任务之间为串行顺序, 而任务内部进行并行处理。斜率算法垂直处理的具体实现步骤为: 将程序分为求模板平方和、求图像累计平方和  $S_1$  以及子孔径光斑定位求斜率三个任务, 每个任务由单个或多个线程执行。水平处理策略则根据子孔径来分配线程, 实现多核并行。线程需要处理从子孔径数据输入到斜率结果输出的整个过程, 不对斜率计算进行任务划分。

除此之外, 还可用向量指令集扩展 AVX 实现运算向量化, 提升程序处理速度。

为了查看程序并行化和运算向量化的效果,在 Intel(R) Core(TM) i7-3770k 四核计算机上,用 C 语言实现斜率计算,并分别测试串行无优化程序、垂直并行程序和水平并行程序的斜率提取时间。根据测试结果,选用执行时间较短的水平并行程序进行 AVX 优化,并统计时间。表 1 是用这 4 种程序实现一帧图像的 400 个子孔径的 NCC 斜率探测,重复 1000 次得到的平均用时近似值,其中子孔径的分辨率为 15 pixel×15 pixel,相关模板的分辨率为 9 pixel×9 pixel。

表 1 不同程序实现 NCC 斜率算法的时间

Table 1 Time of NCC-based slope calculation of different programs

Program	Processing time / $\mu\text{s}$
One-thread program	1140
Vertical processing program (4-thread)	560
Horizontal processing program (4-thread)	370
Horizontal processing and AVX used program	340

从表 1 可以看出,单线程串行程序完成斜率计算的时间在 1140  $\mu\text{s}$  左右,此时计算机只有单核运行,CPU 利用率低。而垂直并行时,程序的运行时间为 560  $\mu\text{s}$  左右,采用水平策略并行程序时,完成斜率计算的时间在 370  $\mu\text{s}$  左右,运行效率进一步提高。对比垂直策略并行和水平策略并行可知,采用水平并行比垂直并行的执行时间更短。这是因为在斜率垂直并行中,像素平方累计的区域是整帧图像,每次累计计算都基于前几次计算结果,具有很强的上下文相关性,无法进行并行化,降低了整个代码的并行度。而且光斑定位必须等到平方和计算完成才能开始,增加了线程等待开销。在水平策略并行中,将子孔径作为像素平方累计的区域,不同子孔径间可并行处理,提升了累计计算的并行度。子孔径的光斑定位在相应子孔径的像素平方累计完成后即可开始,缩短了等待时间,提高了 CPU 利用率。因此,选用水平策略来并行程序,再用 AVX 指令进一步优化。优化后,互相关斜率计算时间缩短到 340  $\mu\text{s}$  左右,能满足一般自适应光学系统对数据处理速度的要求。

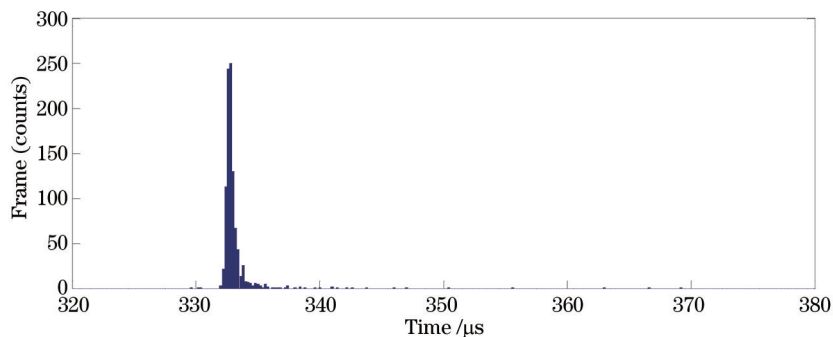


图 4 使用 4 线程并行及 AVX 优化后的 NCC 斜率处理时间抖动

Fig.4 Time jitter for NCC-based slope computation with 4-thread and AVX optimization

上述时间测试在 Windows 7 操作系统上实现,而 Windows 7 属于非实时操作系统,其任务调度机制使程序运行时间具有一定的随机性,因此需要对程序处理时间进行统计。图 4 所示为同时运用水平并行和 AVX 指令向量化的程序对 1000 帧图像进行重复斜率探测所用时间统计分布图。从图中可以看出,虽然完成一帧图像斜率探测的时间有所抖动,但基本集中在 330~340  $\mu\text{s}$  之间。分析具体统计数据得知,斜率处理时间分布在  $(335 \pm 5)$   $\mu\text{s}$  之间的图像占总帧数的 97% 以上。而且程序用 C 语言编写,用 OpenMP 语句并行化,两者都支持各种操作系统,AVX 指令的使用也不受限于操作系统,所以在实时性和可靠性要求更高的系统中,可以将优化后的程序移植到 Xenomai 等基于 Linux 的实时操作系统中,以获得更小的时间抖动。

#### 4 实验结果及分析

搭建了自适应光学系统,并应用优化提升后的互相关算法进行斜率探测,展开闭环实验,检测其有效性。

图 5 所示为 AO 系统的光路示意图,图中 DM 为变形反射镜,HV 为高压放大器,中心波长  $\lambda=650$  nm 的激光束通过直径为 70  $\mu\text{s}$  的尾纤输出后,经过口径为 55 mm、焦距为 300 mm 的双胶合透镜 L1 准直为平行光。

该平行光通过口径为 20 mm 的变形镜小角度反射后进入透镜 L2、L3 组成的缩束系统。缩束后的光通过分光镜 P, 一部分进入哈特曼-夏克传感器进行像差探测, 另一部分通过焦距为 300 mm 的透镜 L4, 在 CCD 上成像以观测 P 处波前的远场。

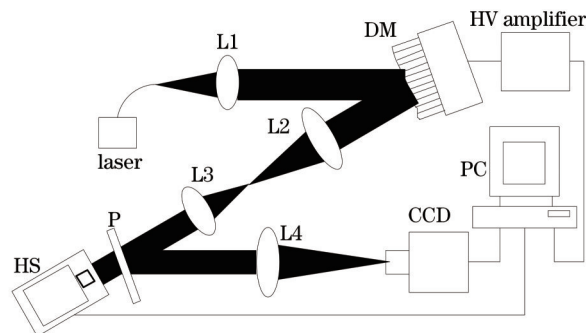


图5 自适应系统光路示意图

Fig.5 Optical setup of the adaptive optics system

计算机接收到哈特曼-夏克波前传感器采集到的图像后, 经过斜率提取、波前复原和控制运算, 产生控制信号。信号经过高压放大器控制变形镜进行波前校正, 校正结果由传感器和 CCD 成像系统反馈给计算机, 实现系统闭环。图 6 所示为 AO 系统的实物图, 除计算机和高压放大器外的所有器件都摆放在光学平台上。系统主要参数如表 2 所示。

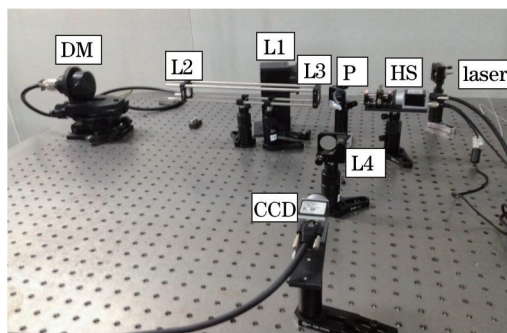


图6 自适应光学系统实物图

Fig.6 Photograph of the adaptive optics system

表2 AO系统参数

Table 2 Parameters of the AO system

AO system	Parameter
Frame rate	60 frame/s
Pixel bit depth	12 bits
Number of valid subapertures	188 (16 pixel×16 pixel)
Number of pixels per subaperture	24 pixel×24 pixel
Number of reference pixels	8 pixel×8 pixel
DM type/number of actuators	Bimorph/35

哈特曼-夏克传感器在实际使用时, 可能会由于系统中部件的多次反射或系统杂散光进入探测器而导致伪光斑现象。使用质心算法时, 必须通过减阈值将伪光斑减掉才能进行有效的探测。但在减掉伪光斑的同时, 真实光斑的信号量也会被减掉, 特别是当伪光斑与真实光斑的强度差别不大, 甚至超过真实光斑的强度时, 减阈值的质心算法将无法正常工作, 然而互相关斜率探测在这种情况下也能正常工作。

在波前探测器前添加干扰光源来模拟伪光斑情况。图 7 所示为点光源和干扰光源通过透镜阵列形成的子孔径图像, 其中图像右方的光斑团是由于干扰光源产生的伪光斑。由图中可看出, 伪光斑强度接近真实光斑, 通过传统的减阈值质心算法无法进行有效斜率探测。在这种情况下, 利用搭建的 AO 系统对激光进行闭环校正, 检验互相关算法的探测效果。

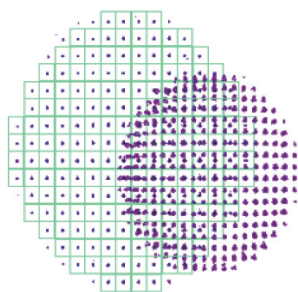


图7 伪光斑下的子孔径图像

Fig.7 Subaperture image affected by false light spots

图8所示为CCD探测到的远场光斑图像,其中图8(a)是系统闭环前的光斑,图8(b)是闭环校正后的光斑图像,可知波前畸变得到了有效补偿。图9所示为校正前后的波前相面及具体参数的变化。通过系统校正,波前相面的峰谷值(PV)由原来的 $1.958\lambda$ 减小为 $0.350\lambda$ ,均方根值(RMS)从 $0.496\lambda$ 减小为 $0.056\lambda$ ( $\lambda$ 为上述激光束的中心波长,即 $650\text{ nm}$ )。图8和图9均表明,互相关算法可排除伪光斑等噪声干扰,准确探测波前斜率,使系统进行有效波前校正。

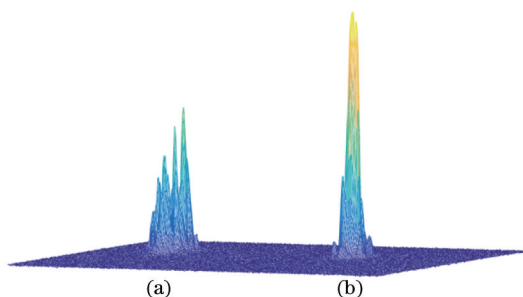


图8 激光光源的闭环校正结果。(a) 校正前;(b) 校正后

Fig.8 Closed-loop correction of laser light source. (a) Before correction; (b) after correction

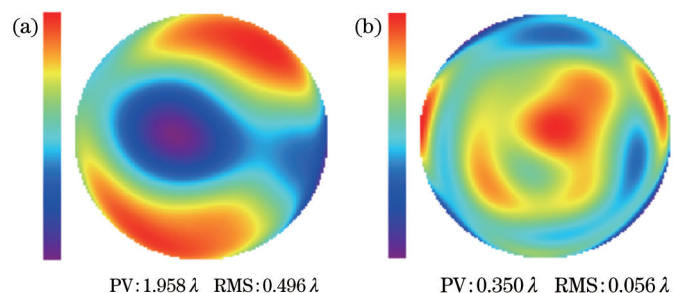


图9 (a) 闭环前的波面图;(b) 闭环后的波面图

Fig.9 (a) Wavefront before closed-loop correction; (b) wavefront after closed-loop correction

## 5 结 论

实现了归一化互相关算法的波前斜率处理,使用四核CPU完成图像数据的处理和波前校正器的控制,并搭建了整个自适应光学系统,完成了归一化互相关波前处理机的性能测试。从测试结果可以看出,用多核CPU实现的波前处理机能应用于自适应光学系统,使系统进行有效的波前校正。该波前处理机所使用的归一化互相关斜率算法,使自适应光学系统有良好的抗噪能力,能排除伪光斑等强噪声的干扰,准确探测波前信息并进行相应波前补偿。

对归一化互相关算法进行了优化,用OpenMP并行编程语言实现程序的多核并行,比较垂直优化策略和水平优化策略,选择较优的水平并行方式,用AVX指令使部分程序循环向量化,进一步提升了斜率探测的速度。在四核计算机上使用优化后的并程序,完成400个 $15\text{ pixel}\times 15\text{ pixel}$ 大小的子孔径斜率计算,用时约为 $340\ \mu\text{s}$ 。系统在一台计算机上同时实现了波前任务处理和系统性能的监控,简化了系统规模,也降低了

系统的成本,特别适合中小型自适应光学系统的处理要求。而且如果采用更多核数、更高主频的计算机进行归一化互相关斜率处理时,可获得更高的计算处理性能,满足更大规模自适应光学系统的处理需求。

下一步的研究将围绕减小斜率处理的时间抖动和扩大计算机规模两个方面展开。由于 Windows 7 是非实时操作系统,斜率处理的时间有较大的抖动,将把归一化互相关算法移植到 Xenomai 等实时操作系统中,以获得更小的时间抖动和更稳定的时间性能。另一方面将改进算法,用消息传递编程模型 MPI 代替多核共享存储模型 OpenMP 实现程序的并行化,将其推广到多机分布式系统中,组建多 CPU 机群来完成互相关斜率计算,以满足高帧频、大数据量的超大规模自适应光学系统的波前处理要求。

### 参 考 文 献

- 1 Jiang Wenhan. Adaptive optical technology[J]. Chinese Journal of Nature, 2005, 28(1): 7-13.  
姜文汉. 自适应光学技术[J]. 自然杂志, 2005, 28(1): 7-13.
- 2 Xiao Fei, Dai Yun, Zhao Junlei, *et al.*. High-resolution retinal imaging system with dual deformable mirrors[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(5): 0501004.  
肖 飞,戴 云,赵军磊,等. 双变形镜人眼视网膜高分辨率显微成像系统[J]. 光学学报, 2015, 35(5): 0501004.
- 3 Jiang Wenhan, Yang Zeping, Guan Chunlin, *et al.*. New progress on adaptive optics in inertial confinement fusion facility[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(7): 1625-1634.  
姜文汉,杨泽平,官春林,等. 自适应光学技术在惯性约束聚变领域应用的新进展[J]. 中国激光, 2009, 36(7): 1625-1634.
- 4 Wang Yanping, Wang Qianqian, Ma Chong. Study on Hartmann wavefront analyzer calibration method[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(1): 0108003.  
王艳萍,王茜茜,马 冲. 哈特曼波前分析仪校准方法实现[J]. 中国激光, 2015, 42(1): 0108003.
- 5 Rao Changhui, Zhang Xuejun, Jiang Wenhan. Simulation study on correlating Hartmann-Shack wavefront sensor for solar granulation [J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(3): 285-289.  
饶长辉,张学军,姜文汉. 太阳米粒结构相关哈特曼夏克波前传感模拟研究[J]. 光学学报, 2002, 22(3): 285-289.
- 6 Jia Jianlu, Wang Jianli, Zhao Jinyu, *et al.*. 961-element adaptive optical wave-front processor[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(6): 1387-1392.  
贾建禄,王建立,赵金宇,等. 961 单元自适应光学系统波前处理器[J]. 光学 精密工程, 2013, 21(6): 1387-1392.
- 7 Wang Zhui. Research of Real-Time Wavefront Processing Algorithms Based on Multi-Core DSP[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014.  
王 追. 基于多核 DSP 的波前处理算法实时性研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
- 8 Mauch S, Reger J, Reinlein C, *et al.*. FPGA-accelerated adaptive optics wavefront control[C]. SPIE, 2014, 8978: 897802.
- 9 Reinig M, Gavel D, Ardestani E, *et al.*. Real-time control for Keck observatory next-generation adaptive optics[C]. SPIE, 2010, 7736: 77363J.
- 10 Truong T N, Bouchez A H, Burrusset R S, *et al.*. Design and implementation of the PALM-3000 real-time control system[C]. SPIE, 2012, 8447: 84472F.
- 11 Yang Haifeng. High Speed Data Transmission, Signal and Power Integrity Technologies for Adaptive Optics Wavefront Processor[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014.  
杨海峰. 自适应光学波前处理机高速数据传输和信号与电源完整性技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
- 12 Basden A, Geng D, Myers R, *et al.*. Durham adaptive optics real-time controller[J]. Applied Optics, 2010, 49(32): 6354-6363.
- 13 Choi S, Nah J, Moon Y J, *et al.*. Development of a correlation tracker system for the new solar telescope[C]. SPIE, 2008, 7015: 138-146.
- 14 Berkefeld T, Soltau D, Schmidt D, *et al.*. Adaptive optics development at the German solar telescopes[J]. Applied Optics, 2010, 49(31): G155-G166.
- 15 Chen S Q, Zhao E Y, Xu W, *et al.*. A compact multi-core CPU based adaptive optics real-time controller[C]. SPIE, 2014, 9280: 928012.
- 16 Yang Jingwen, Chen Shanqiu, Rao Changhui, *et al.*. Processing unit of a correlation tracking system based on an RTAI real-time operating system[J]. Astronomical Research & Technology, 2011, 8(3): 285-292.  
杨靖文,陈善球,饶长辉,等. 一种基于 RTAI 实时操作系统的相关跟踪处理机[J]. 天文研究与技术, 2011, 8(3): 285-292.
- 17 Rodríguez-Ramos L F, Chulani H, Martín Y, *et al.*. FPGA-based real time controller for high order correction in EDIFISE[C]. SPIE, 2012, 8447: 84472R.



- 18 Li Jing, Gong Yan, Hu Xinrong, *et al.*. A high-precision centroid detecting method for Hartmann-Shack wavefront sensor[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(3): 0316002.  
李 晶, 巩 岩, 呼新荣, 等. 哈特曼-夏克波前传感器的高精度质心探测方法[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0316002.
- 19 Shen Tingting. Real-Time Wavefront Processor for Solar Adaptive Optical System Based on Cross Correlation Coefficient Algorithm[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015.  
沈婷婷. 基于互相关因子算法的太阳自适应光学波前实时处理技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.
- 20 Tang Guanqun. Analysis and comparison of several calculation methods of beam spot center[J]. Journal of Beijing Institute of Machinery, 2009, 24(1): 61-64.  
唐冠群. 几种激光光斑中心定位算法的比较[J]. 北京机械工业学院学报, 2009, 24(1): 61-64.
- 21 Xie Weida, Zhou Yuheng, Kou Ruolan. An improved fast normalized cross correlation algorithm[J]. Journal of Tongji University, 2011, 39(8): 1233-1237.  
谢维达, 周宇恒, 寇若岚. 一种改进的快速归一化互相关算法[J]. 同济大学学报, 2011, 39(8): 1233-1237.
- 22 Wu Qiang, Ren Lin, Zhang Jie, *et al.*. Fast algorithm of normalized cross correlation and optimized implementation on DSP[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2011, 25(6): 495-499.  
吴 强, 任 琳, 张 杰, 等. 快速归一化互相关算法及 DSP 优化实现[J]. 电子测量与仪器学报, 2011, 25(6): 495-499.
- 23 Lewis J P. Fast normalized cross correlation[C]. Proceedings of Vision Interface, 1995: 120-123.

栏目编辑: 史 敏