

文章编号:1007-2780(2016)05-0491-06

基于多 GPU 的液晶自适应光学波前处理器

李大禹*

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室吉林 长春 130033)

摘要:为了满足 4 m 天文望远镜液晶自适应光学系统的波前处理要求,研究了基于多 GPU 的波前处理器。介绍了液晶自适应光学波前处理方法。分析了用于匹配 4 m 望远镜的哈特曼探测器数目、Zernike 模式数和液晶校正器驱动单元数。详细论述了多 GPU 下波前处理方法,包括:单 GPU 下计算斜率;按列分块法拟合 Zernike 系数;Zernike 对称性算法和按行分块法计算液晶校正器灰度图。最后,分析了匹配 4 m 望远镜的液晶自适应光学系统的残余误差传递函数,并由此模拟了残余误差传递函数的幅频响应。实验结果表明,斜率计算延迟 18 μs ,Zernike 系数拟合延迟 39 μs ,校正器灰度图计算延迟 114 μs 。多 GPU 下总的波前处理延迟 171 μs ,小于哈特曼探测器采样时间 500 μs ,液晶自适应光学系统-3 dB残余误差抑制带宽可达 53 Hz。满足 4 m 天文望远镜的应用要求。

关键词:图形处理器;液晶;自适应光学

中图分类号:O753;TP217 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20163105.0491

Liquid crystal adaptive optics wavefront processor based on multi-GPU

LI Da-yu*

(State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics,
Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: In order to meet the wavefront processing requirements of liquid crystal adaptive optics system which match 4 m astronomy telescope, a wavefront processor (LCWP) based on multi-GPU is developed. First, the liquid crystal adaptive optics wavefront processing method is described. The numbers of hartmann detector's microlenses, Zernike modes and liquid crystal corrector's drive unit are analyzed, which need to match 4 m telescope. Then the wavefront processing methods based on multi-GPU are discussed in detail; single GPU method is used to calculate slope; block-column distribution method is used to fit Zernike coefficient; Zernike polynomial symmetry algorithm and block-row distribution method are used to compute gray map of liquid crystal corrector. Finally, the transfer function of liquid crystal adaptive optics system for matching 4 m telescope is analyzed and magnitude of the residual error transfer function is simulated. The latency of slope calculation is 18 μs , the latency

收稿日期:2015-08-09;**修订日期:**2015-09-17.

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 61405194)

Supported by National Natural science Foundation of China(No. 61405194)

* 通信联系人, E-mail: lidayu@ciomp.ac.cn

of Zernike coefficient fitting is $39\ \mu\text{s}$ and the latency of computing gray map is $114\ \mu\text{s}$. The total computing latency is $109\ \mu\text{s}$ and temporal band width in our liquid crystal adaptive optics system is $53\ \text{Hz}$. It is shown that our LCWP based on multi-GPU has the ability to match 4 m astronomy telescope.

Key words: GPU; liquid crystal; adaptive optics

1 引言

大口径望远镜是高分辨率天文观测的重要手段。然而大气湍流的动态扰动,严重影响了望远镜的成像分辨率。自适应光学技术通过实时的波前探测,波前处理和波前校正,克服了大气湍流的干扰,使望远镜获得良好的成像质量^[1]。目前波前校正器件主要使用变形镜,其驱动单元数目与望远镜口径的关系是 $N = (D/r_0)^2$,其中 N 是变形镜驱动单元数, D 是望远镜口径, r_0 是大气相干长度。在中等湍流强度 $10\ \text{cm}$ 条件下, $4\ \text{m}$ 天文望远镜需要匹配 $1\ 600$ 个驱动单元。超过 $1\ 000$ 单元的变形镜加工难度巨大,成本至少千万元级别,严重制约了 $4\ \text{m}$ 甚至更大口径望远镜的发展。近年来,作为一种新型波前补偿器件,液晶波前校正器得到了更加广泛的关注和认可。由于具有数十万个驱动单元数,液晶波前校正器在空间分辨率上可满足 $4\sim 8\ \text{m}$ 口径望远镜的应用要求^[2]。但是液晶校正器的驱动单元数远远大于变形镜,相应的波前数据处理量也剧烈增加,需要研制波前处理器以满足实时处理的要求^[3]。

目前实际应用的波前处理器主要基于信号处理器(DSP)、可编程逻辑器件(FPGA)和图形处理器(GPU)。2014年,中科院光电技术研究所采用单片 TI C6678 DSP(L2 级缓存 $4\ \text{MB}$)处理 913 单元变形镜系统,单帧处理延迟 $270.6\ \mu\text{s}$ ^[4]。2011年,中科院长春光机所采用 10 块 xilinx virtex 4 Lx80 FPGA(缓存 $450\ \text{KB}$)处理 961 单元的变形镜系统,单帧处理延迟 $338\ \mu\text{s}$ ^[5]。DSP 和 FPGA 的计算瓶颈在于片内缓存容量,即数据处理量不能大于片内缓存容量。 $4\ \text{m}$ 液晶自适应光学系统的波前处理数据量至少 $100\ \text{MB}$,远大于 DSP 和 FPGA 的片内缓存容量。因此,DSP 和 FPGA 不适合执行 $4\ \text{m}$ 液晶自适应光学系统的波前处理任务。

图形处理器(GPU)是一种专门用于图形显示的芯片,由于集成大量的乘加处理器和极高的

存储器带宽,GPU 非常适合执行大数据量的波前重构任务。2008年美国喷气推进实验室在其 $5.1\ \text{m}$ hale 望远镜的 Palm-3000 自适应光学系统中,采用 16 块 GeForce 8800Ultra GPU 执行 $3\ 721 \times 8\ 192$ 的矩阵向量乘法,延迟为 $196\ \mu\text{s}$ ^[6]。2007年,本研究组开始利用 GPU 进行波前处理的研究^[7-8]。2010年,本研究组采用一块 Geforce 9800 GTX GPU 执行 $262\ 144 \times 35$ 的矩阵向量乘法的延时为 $670\ \mu\text{s}$ ^[9]。2013年,本研究组采用 GeForce GTX590 GPU 进行波前处理,由于使用了 Zernike 四象限对称性算法, $65\ 536 \times 209$ 矩阵向量乘法延时从 $196\ \mu\text{s}$ 降低到 $62\ \mu\text{s}$ ^[10]。对于 $4\ \text{m}$ 级的望远镜,哈特曼探测器的微透镜数和 Zernike 多项式的项数大幅提高,单个 GPU 已经不能满足波前处理要求。因此,本文提出一种基于多 GPU 的液晶自适应光学波前处理器,通过为多个 GPU 合理分配计算任务,满足 $4\ \text{m}$ 级大口径天文望远镜的应用要求。

2 波前处理概况

波前处理是把哈特曼探测器所测到的波前畸变信号转换成液晶波前校正器的控制信号的过程。哈特曼探测器给出的原始探测信号是一幅光斑阵列,对这幅光斑阵列的处理包括斜率计算、波前重构、波前控制 3 个数据处理任务。斜率计算是计算哈特曼探测器每个子孔径的波前斜率。波前重构是由波前斜率计算出液晶校正器每个像素对应的波前位相。由于液晶自适应系统采用开环校正,波前控制只是简单的比例控制器,计算量很少。

在波前重构中,由于液晶校正器的像素与哈特曼探测器的子孔径不对应,需要先用 Zernike 多项式拟合探测信号,然后再用拟合出的 Zernike 系数计算出液晶校正器的波前位相^[11]。其具体方法是两个矩阵向量乘法:由重构矩阵与波前斜率向量相乘得到 Zernike 系数向量;由 Zernike 矩阵与 Zernike 系数向量相乘得到校正器灰度图

向量。

波前处理的数据量大小由哈特曼探测器的子孔径数、拟合的 Zernike 模式数以及液晶校正器的像素数决定。对于 4 m 级大口径望远镜,在中等湍流强度 10 cm 条件下,微透镜数目 1 600 个。Zernike 模式数至少是微透镜数目的一半,即 800 项^[12]。液晶校正器采用 BNS 公司 PFP256 液晶空间光调制器,像素数为 256×256 个,远大于微透镜数目。在本文中,波前处理器的 CPU 采用 Intel Xeon x5687,4 核 3.6 GHz 主频,操作系统是 CentOS6.4(linux 2.6 内核)。软件开发平台是 CUDA6.5,GPU 采用 GeForce GTX 690 卡,其内部包含两颗 GK104 GPU 芯片。每颗 GK104 内集成 1 536 个处理器,时钟频率 915MHz,显存带宽 192 GB/s。为满足 4 m 望远镜的波前处理要求,波前处理系统采用两块 GeForce GTX 690 卡,共 4 颗 GK104 GPU 芯片,显存带宽共 768 GB/s。

3 GPU 波前处理方法

3.1 GPU 斜率计算

斜率计算包括两部分过程:完成每个子孔径的质心计算,这部分占用了斜率计算绝大多数计算量;计算得到的质心与参考做差,然后除以子孔径有效焦距,这部分计算量小。质心计算公式为:

$$\begin{cases} X=\sum_{i,j}x_iI_{i,j}/\sum_{i,j}I_{i,j} \\ Y=\sum_{i,j}y_jI_{i,j}/\sum_{i,j}I_{i,j} \end{cases}, \quad (1)$$

式中:X、Y 分别为子孔径的横纵质心,(x_i,y_j)为像素坐标, $I_{i,j}$ 为坐标 (x_i,y_j)上的像素灰度图。哈特曼探测器相机采用 e2v CCD220 芯片,像素数 240×240,帧频可达 2 000 Hz。哈特曼探测器的微透镜数 40×40 个,其中每个子孔径占用 6×6 个像素。

为了提高 GPU 的并行度,本文为斜率计算开辟了 1 600×4 个线程,其中每个子孔径的斜率计算任务占用 4 个线程。每个子孔径的质心计算可分解为 $\sum_{i,j}x_iI_{i,j}$ 、 $\sum_{i,j}y_jI_{i,j}$ 、 $\sum_{i,j}I_{i,j}$ 三组求和计算,其求和方法参考了 Mark Harris 的并行求和方法^[13]。实验测得单 GPU 下和 4GPU 下斜率计算延迟为如表 1 所示。

表 1 斜率计算延迟
Tab.1 Latency of slope calculation

	单 GK104 GPU	4 GK104 GPU
斜率计算延迟	18 μs	20 μs

由表 1 看出,4GPU 的斜率计算比单 GPU 的延迟要长,因为斜率计算量太小,单个 GPU 和 4 个 GPU 的计算延迟相同,而 4 个 GPU 的数据同步引起了 2 μs 的延迟。

3.2 GPU 拟合 Zernike 系数

Zernike 系数拟合是重构矩阵与波前斜率向量进行矩阵向量乘法,其中重构矩阵是响应矩阵的逆矩阵,而响应矩阵是预先实验测得的^[11]。CUDA 提供了基础线性代数子程序(CUBLAS)库,其中的 cublasSgemv 函数可以在 GPU 中高效计算单精度浮点型的矩阵向量乘法。重构矩阵大小为 800 行、3 200 列,波前斜率向量大小为 3 200 行。在 4 个 GPU 中,矩阵向量乘法可以被分成 4 个小的矩阵向量乘法,每个 GPU 负责执行一个小的矩阵向量乘法。对于 4 个 GPU 来说,有 3 种矩阵划分方法:按行分块、按列分块、按行列分块(图 1)。

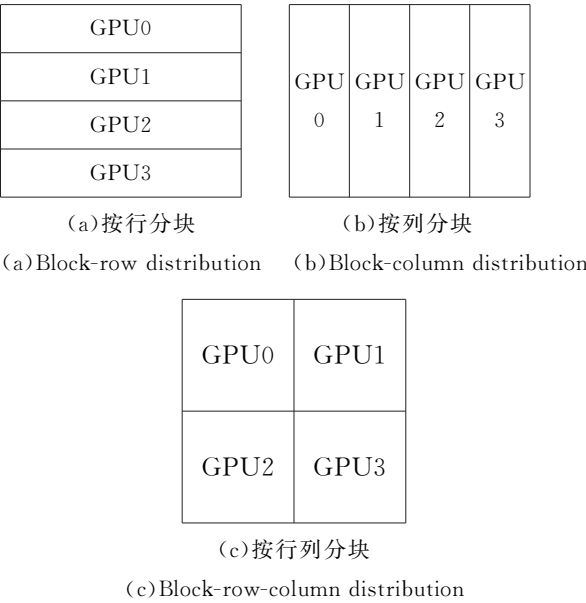


图 1 矩阵划分方法示意图

Fig.1 Schematic diagram of matrix partitioning method

按行分块可以直接拟合出 Zernike 系数,而按列分块和按行列分块得到的结果还需要加到一起才能拟合出 Zernike 系数。实验测得 3 种矩阵

划分的 Zernike 系数拟合延迟如表 2 所示。由表 2 看出按列分块法拟合 Zernike 系数的延迟最小, 为 39 μs 。

表 2 Zernike 系数拟合延迟

Tab. 2 Latency of Zernike polynomial fitting

	按行分块	按列分块	按行列分块
Zernike			
系数拟	85 μs	34 $\mu\text{s}+5 \mu\text{s}$	91 $\mu\text{s}+5 \mu\text{s}$
合延迟			

3.3 GPU 计算校正器灰度图

校正器灰度图计算是 Zernike 矩阵与 Zernike 系数向量进行矩阵向量乘法, 其中 Zernike 矩阵由 Zernike 多项式组成。Zernike 多项式表达式为

$$Z_i(r,\theta)=\begin{cases} N_n^mR_n^{|m|}(r)\cos(m\theta), & m\geqslant 0 \\ -N_n^mR_n^{|m|}(r)\sin(m\theta), & m<0 \end{cases}, \quad (2)$$

式中: $0\leqslant r\leqslant 1, 0\leqslant \theta\leqslant 2\pi, n$ 为非负整数, m 为取值介于 $-n$ 和 n 之间, 且步长为 2 的整数。 $R_n^{|m|}(r)$ 是多项式的径向函数, 如式 3 所示。

$$R_n^{|m|}(r)=\sum_{s=0}^{(n-|m|)/2}\frac{(-1)^s(n-s)!}{s![(n+|m|)/2-s]![(n-|m|)/2-s]!}r^{n-2s}.$$

(3)

校正器灰度图计算可以用 CUBLAS 库计算, 但此方法的延迟较长, 需要进一步优化波前处理方法。对于矩阵向量乘法任务, GPU 的处理瓶颈在于数据传输带宽。因此如果能有效化简 Zernike 矩阵, 就可以减少数据传输时间从而减小计算延迟。

由公式(2)看出, Zernike 多项式内包含三角函数, 具有四象限奇偶对称性^[10]。因此 Zernike 矩阵可以被化简为原来的 1/4, 通过减少数据传输时间从而减少计算延迟至原来的 1/4。具体方法如图 2 所示: 将 Zernike 矩阵化简后预先存入显存中; 计算时将化简后的 Zernike 矩阵和 Zernike 系数传输到 GPU 中; 在 GPU 中将化简的 Zernike 矩阵复原出完整的 Zernike 矩阵; 最后在 GPU 中执行矩阵向量乘法计算出校正器灰度图。

表 3 计算校正器灰度图延迟

Tab. 3 Latency of computing corrector gray map

	按行分块	按列分块	按行列分块
CUBLAS			
库计算灰度图延迟	374 μs	383 $\mu\text{s}+21 \mu\text{s}$	367 $\mu\text{s}+19 \mu\text{s}$
Zernike			
四象限对称性计算灰度图延迟	114 μs	106 $\mu\text{s}+21 \mu\text{s}$	101 $\mu\text{s}+19 \mu\text{s}$

由表 3 看出, Zernike 四象限对称性算法可以大幅降低计算延迟。GPU 分块对灰度图计算延迟影响不大, 按行分块的延迟最小, 为 114 μs 。

4 带宽模拟

自适应光学系统的残余误差分为空间域残差和时间域残差两部分。包含离焦、象散、彗差、场曲等静态像差的空间域残差不受波前处理延迟的影响, 因此本文中研究的残余误差专指时间域内的残余误差。

匹配 4 m 望远镜的液晶自适应光学系统的残余误差传递函数如公式(4)所示。

$$\varepsilon(s)=\frac{\varphi_{\text{res}}(s)}{\varphi_{\text{tur}}(s)}=1-\frac{K_p(1-e^{-Ts})^2e^{-(\tau_{\text{ro}}+\tau_{\text{wp}}+\tau_{\text{ds}})s}}{T^2s^2(1+\tau_{\text{decay}}s)}, \quad (4)$$

式中: $T=500 \mu\text{s}$ 是哈特曼探测器的曝光时间, $K_p=1$ 是比例系数, $\tau_{\text{ro}}=500 \mu\text{s}$ 是哈特曼读出时间, $\tau_{\text{ds}}=90 \mu\text{s}$ 是数据从波前处理系统发送到液晶



图 2 GPU 灰度图计算示意图

Fig. 2 Schematic diagram of computing gray map by GPU

与 CUBLAS 库相比, 四象限对称性算法可有效减小校正器灰度图的计算延迟。Zernike 矩阵大小为 65 536 行, 800 列, Zernike 系数向量大小为 800 行, 实验测得 CUBLAS 库和 Zernike 四象限对称性算法的灰度图计算延迟如表 3 所示。

校正器数模转换的时间, $\tau_{\text{delay}} = 1 \text{ ms}$ 是液晶校正器的延迟时间^[14]。波前处理延迟 τ_{wp} 不能超过哈特曼探测器的曝光时间 $500 \text{ }\mu\text{s}$, 在本文中 $\tau_{\text{wp}} = 18 + 39 + 114 = 171 \text{ }\mu\text{s}$ 。一旦参数确定, 残余误差传递函数的幅频响应可以被模拟出来, 如图 3 所示。

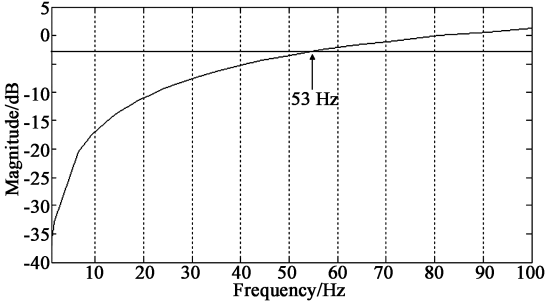


图 3 残余误差传递函数的幅频响应曲线

Fig. 3 Magnitude of the residual error transfer function

由图 3 可以看出, 液晶自适应光学系统的一 3 dB 残余误差抑制带宽为 53 Hz。

5 结 论

本文提出了基于多 GPU 的液晶自适应光学波前处理器, 通过单 GPU 斜率计算、按列分块法 Zernike 系数拟合以及按行分块法校正器灰度图计算, 使得总的计算延迟为 $171 \text{ }\mu\text{s}$, 小于哈特曼探测器采样时间 $500 \text{ }\mu\text{s}$ 。通过模拟残余误差传递函数的幅频响应, 看出液晶自适应光学系统的一 3 dB 残余误差抑制带宽为 53 Hz, 满足 4 m 级大口径天文望远镜的应用要求。

参 考 文 献:

[1] LÉNA P. Adaptive optics: a breakthrough in astronomy [J]. *Experimental Astronomy*, 2009, 26(1/3): 35-48.

[2] 宣丽, 李大禹, 刘永刚. 液晶自适应光学在天文学研究中的应用展望[J]. *液晶与显示*, 2015, 30(1): 1-9.

XUAN L, LI D Y, LIU Y G. Prospect of liquid crystal adaptive optics in astronomy application [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2015, 30(1): 1-9.

[3] BASDEN A, GENG D L, MYERS R, *et al.* Durham adaptive optics real-time controller [J]. *Applied Optics*, 2010, 49(32): 6354-6363.

[4] 王追. 基于多核 DSP 的波前处理算法实时性研究[D]. 成都: 中国科学院研究生院光电技术研究所, 2014.

WANG Z. Research of real-time wavefront processing algorithms based on multi-core DSP [D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)

[5] 贾建禄, 王建立, 赵金字, 等. 基于 FPGA 的自适应光学系统波前处理机[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(8): 1716-1722.

JIA J L, WANG J L, ZHAO J Y, *et al.* Adaptive optical wave-front processor based on FPGA [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(8): 1716-1722. (in Chinese)

[6] TRUONG T N, BOUCHEZ A H, DEKANY R G, *et al.* Real-time wavefront control for the PALM-3000 high order adaptive optics system [C]. *Proceedings of the SPIE 7015, Adaptive Optics Systems*, Marseille, France: SPIE, 2008, 7015: 70153I.

[7] 李大禹, 胡立发, 穆全全, 等. 基于 GPU 的液晶自适应光学波前重构计算[J]. *光子学报*, 2008, 37(8): 1643-1647.

LI D Y, HU L F, MU Q Q, *et al.* Wavefront reconstruction calculation of liquid crystal adaptive optics based on GPU [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(8): 1643-1647. (in Chinese)

[8] 李大禹, 胡立发, 穆全全, 等. GPU 计算液晶自适应光学波前重构的并行性研究[J]. *液晶与显示*, 2007, 22(5): 572-575.

LI D Y, HU L F, MU Q Q, *et al.* Wavefront reconstruction parallel computing of liquid crystal adaptive optics based on GPU [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2007, 22(5): 572-575. (in Chinese)

[9] 李大禹, 胡立发, 穆全全, 等. CUDA 架构下的液晶自适应波面数值解析[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(4): 848-854.

LI D Y, HU L F, MU Q Q, *et al.* Wavefront calculation of liquid crystal adaptive optics based on CUDA [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(4): 848-854. (in Chinese)

[10] LI D Y, HU L F, MU Q Q, *et al.* Wavefront processor for liquid crystal adaptive optics system based on Graphics Processing Unit [J]. *Optics Communications*, 2014, 316: 211-216.

[11] LIU C, HU L F, MU Q Q, *et al.* Open-loop control of liquid-crystal spatial light modulators for vertical atmospheric turbulence wavefront correction [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(1): 82-89.

[12] DAI G M. Modal wave-front reconstruction with Zernike polynomials and Karhunen - Loève functions [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1996, 13(6): 1218-1225.

[13] HARRIS M. Optimizing parallel reduction in CUDA[EB/OL]. <http://developer.download.nvidia.com/asserts/cuda/files/reduction.pdf>.

[14] PENG Z H, LIU Y G, YAO L S, *et al.* Improvement of the switching frequency of a liquid-crystal spatial light modulator with optimal cell gap [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(18): 3608-3610.

作者简介:李大禹(1979—),男,吉林长春人,博士,副研究员,硕士生导师,主要从事液晶自适应光学波前处理、GPU 并行计算等方面的研究。