



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 102147530 A

(43) 申请公布日 2011.08.10

(21) 申请号 201110079066.0

(22) 申请日 2011.03.31

(71) 申请人 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

地址 130033 吉林省长春市东南湖大路 3888 号

(72) 发明人 宣丽 李大禹 曹召良 胡立发 穆全全 彭增辉 刘永刚 鲁兴海

(74) 专利代理机构 长春菁华专利商标代理事务所 22210

代理人 南小平

(51) Int. Cl.

G02B 27/00(2006.01)

G06F 17/16(2006.01)

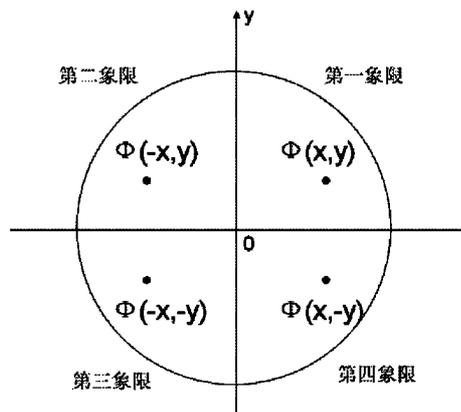
权利要求书 4 页 说明书 5 页 附图 2 页

(54) 发明名称

适用于液晶自适应光学系统的快速波前重构方法

(57) 摘要

本发明属于自适应光学技术领域,涉及大气通道光波前的探测信号到位相数字信号的数据传输与计算,是一种适用于液晶自适应光学系统的快速波前重构方法。该方法利用 Zernike 模式的奇偶性,将 Zernike 模式矩阵按照四个象限分成四个子矩阵;选择其中一个子矩阵为根矩阵存入显存,并确定根矩阵与其它三个子矩阵的变换关系;然后将显存中预存的根矩阵读取到 GPU 的共享内存中,并与测得的未知波前的 Zernike 模式系数列向量进行矩阵乘法,即可重构出与液晶波前校正器像素面阵对应的位相波前。该方法理论上可节约 3/4 的波前重构时间。



1. 一种适用于液晶自适应光学系统的快速波前处理方法,首先在液晶自适应光学系统的控制主机中以液晶波前校正器的像素面阵为波前位相分布的位置坐标系,将 Zernike 多项式每项前面的系数取为 1 个波长,计算出 Zernike 多项式的每一项即每一模式的位相分布;这些 Zernike 模式波前数据为预存数据,用这些波前模式的线性组合拟合波前探测信号,得出被测波前的 Zernike 模式系数列向量 A,然后依据下式的矩阵乘法重构出被测波前位相矩阵 Φ 的表达式:

$$\Phi = Z \cdot A \quad (1)$$

$$\text{式中 } Z = \begin{pmatrix} z_{1,1} & z_{1,2} & \cdots & z_{1,k} \\ z_{2,1} & z_{2,2} & \cdots & z_{2,k} \\ \text{M} & \text{M} & \text{O} & \text{M} \\ z_{h,1} & z_{h,2} & \text{L} & z_{h,k} \end{pmatrix} \text{ 为上述预存的 Zernike 模式波前位相矩阵,矩阵元的下}$$

角标 k 为列的数目、对应 Zernike 模式的数目, h 为行的数目、对应液晶波前校正器的像素数。这种适用于液晶自适应光学系统的快速波前处理方法的特征是:

将 Zernike 模式分成余弦模式和正弦模式, Zernike 多项式的表达形式分为余弦多项式和正弦多项式,

$$Z_n^m(\rho, \theta) = R_n^m(\rho) \cdot \cos(m\theta) \quad m \leq 0 \quad (2)$$

$$Z_n^m(\rho, \theta) = R_n^m(\rho) \cdot \sin(m\theta) \quad m > 0 \quad (3)$$

其中,表达式 (2) 为余弦多项式,表达式 (3) 为正弦多项式。式中下角标 n 为阶数,只取正整数包括 0,按照从小到大依次排序。在同一阶 n 中含有角频率数 m 从负到正、从小到大依次排序的模式, m 也只取整数;而且 n-|m| 为正偶数包括 0;

在直角坐标系中余弦多项式 (2) 是关于 y 的偶函数,且当 m 分别为奇、偶数时,其多项式是关于 x 的奇、偶函数;正弦多项式 (3) 是关于 y 的奇函数,且当 m 分别为奇、偶数时,其多项式是关于 x 的偶、奇函数;

余弦多项式 (2) 和正弦多项式 (3) 的奇偶对称性,对于任一 Zernike 模式,在第一象限 ($x > 0, y > 0$) 上任意一点 $\Phi(x, y)$,其对应第二象限上一点 $\Phi(-x, y)$ 、第三象限上一点 $\Phi(-x, -y)$ 以及第四象限上一点 $\Phi(x, -y)$,具有以下关系:对于 m 为奇数的余弦模式, $\Phi(x, y) = -\Phi(-x, y) = -\Phi(-x, -y) = \Phi(x, -y)$;对于 m 为偶数的余弦模式, $\Phi(x, y) = \Phi(-x, y) = \Phi(-x, -y) = \Phi(x, -y)$;对于 m 为奇数的正弦模式, $\Phi(x, y) = \Phi(-x, y) = -\Phi(-x, -y) = -\Phi(x, -y)$;对于 m 为偶数的余弦模式, $\Phi(x, y) = -\Phi(-x, y) = \Phi(-x, -y) = -\Phi(x, -y)$;

据此将 Zernike 模式矩阵 Z 对应四个象限分成四个子矩阵,选择其中一个子矩阵的数据存入显存;即时做波前重构处理时,将显存中预存的子矩阵数据传输到 GPU 的共享内存中, GPU 的核处理器利用奇偶对称关系算出其它三个子矩阵上的对称元素;再根据表达式 (1),做 Z 与即时测得的被测波前的 Zernike 模式系数列向量 A 的矩阵乘法,重构出对应液晶波前校正器上各个像素处的波前位相值。

2. 根据权利要求 1 所述的用于液晶自适应光学系统的快速波前处理方法,其特征是按照如下步骤进行:

1) 确定 Zernike 模式数

采用 Zernike 多项式的前 $k+1$ 项, 并去掉平面波特性的第一项, 共有 k 个 Zernike 模式, 即 z_{ij} 中的 $j = 1, \dots, k$;

2) 建立 Zernike 模式矩阵

首先在液晶波前校正器的像素面阵上限定通光圆截面, 圆内包含 h 个像素, 并被分为直角坐标系的四个象限; 通光谱段的中心波长确定后, 对应这个圆面上像素位置建立

$$\text{Zernike 模式矩阵 } Z = \begin{pmatrix} z_{1,1} & z_{1,2} & \dots & z_{1,k} \\ z_{2,1} & z_{2,2} & \dots & z_{2,k} \\ \text{M} & \text{M} & \text{O} & \text{M} \\ z_{h,1} & z_{h,2} & \text{L} & z_{h,k} \end{pmatrix}, \text{ } z_{ij} \text{ 中的 } i = 1, 2, \dots, h, i \text{ 的数字顺序:}$$

首先是按照象限顺序由第一象限、第二象限、第三象限依次排到第四象限; 在第一象限中行顺序是从下到上, 然后每行中从左到右 i 相应增大, 在第一象限中 $i = 1, 2, \dots, h/4$; 第二象限中 i 的行顺序与第一象限的相同, 但每行中 i 是从右到左相应增大, 在第二象限中 $i = 1+h/4, 2+h/4, \dots, h/2$; 第三象限中行顺序是从上到下排序, 每行中 i 的顺序如同第二象限那样从右到左相应增大, 在第三象限中 $i = 1+h/2, 2+h/2, \dots, 3h/4$; 第四象限中行顺序如同第三象限那样从上到下排序, 每行中 i 的顺序如同第一象限那样从左到右相应增大, 在第四象限中 $i = 1+3h/4, 2+3h/4, \dots, h$;

3) 划分 Zernike 模式矩阵的子矩阵

将 Zernike 模式矩阵按照四个象限分成四个子矩阵, 即 $Z = \begin{pmatrix} B \\ C \\ D \\ E \end{pmatrix}$; 其中第一象限

$$\text{子矩阵 B 为: } B = \begin{pmatrix} z_{1,1} & z_{1,2} & \dots & z_{1,k} \\ z_{2,1} & z_{2,2} & \dots & z_{2,k} \\ \text{M} & \text{M} & \text{O} & \text{M} \\ z_{h/4,1} & z_{h/4,2} & \text{L} & z_{h/4,k} \end{pmatrix},$$

$$\text{第二象限子矩阵 C 为: } C = \begin{pmatrix} z_{1+h/4,1} & z_{1+h/4,2} & \dots & z_{1+h/4,k} \\ z_{2+h/4,1} & z_{2+h/4,2} & \dots & z_{2+h/4,k} \\ \text{M} & \text{M} & \text{O} & \text{M} \\ z_{h/2,1} & z_{h/2,2} & \text{L} & z_{h/2,k} \end{pmatrix},$$

$$\text{第三象限子矩阵 D 为: } D = \begin{pmatrix} z_{1+h/2,1} & z_{1+h/2,2} & \dots & z_{1+h/2,k} \\ z_{2+h/2,1} & z_{2+h/2,2} & \dots & z_{2+h/2,k} \\ \text{M} & \text{M} & \text{O} & \text{M} \\ z_{3h/4,1} & z_{3h/4,2} & \text{L} & z_{3h/4,k} \end{pmatrix},$$

$$\text{第四象限子矩阵 } E \text{ 为: } E = \begin{pmatrix} z_{1+3h/4,1} & z_{1+3h/4,2} & \cdots & z_{1+3h/4,k} \\ z_{2+3h/4,1} & z_{2+3h/4,2} & \cdots & z_{2+3h/4,k} \\ M & M & O & M \\ z_{h,1} & z_{h,2} & L & z_{h,k} \end{pmatrix},$$

四个子矩阵均为 $h/4$ 行 k 列；

4) 向显存中预存根矩阵的数据

四个子矩阵中的任意一个都可作为根矩阵,这里使用第一象限子矩阵 B 为根矩阵;按照列优先顺序,即按照 $z_{1,1}, z_{2,1}, z_{3,1}, \dots, z_{h/4,k}$ 的顺序将 B 矩阵数据存入显存中,成为预存数据;

5) 求出 B 与 C 、 D 、 E 之间的变换关系

如果 B 的第 j 列为余弦 Zernike 模式且角频率数 m 为奇数,则 $C_j = -B_j, D_j = -B_j, E_j = B_j$,其中 B_j, C_j, D_j, E_j 分别代表相应矩阵的第 j 列列向量;如果第 j 列余弦 Zernike 模式的角频率数 m 为偶数,则 $C_j = B_j, D_j = B_j, E_j = B_j$;如果 B 的第 j 列为正弦 Zernike 模式且角频率数 m 为奇数,则 $C_j = B_j, D_j = -B_j, E_j = -B_j$;如果第 j 列正弦 Zernike 模式的角频率数 m 为偶数,则 $C_j = -B_j, D_j = B_j, E_j = -B_j$;将 B 与 C 、 D 、 E 之间的变换关系程序存入 GPU 的共享内存中;

6) 获得波前探测与被测波前的 Zernike 模式系数列向量 A

通过哈特曼波前探测器测得入射波前的信号矩阵;此矩阵经控制主机的处理转换为被测波前的 Zernike 模式系数列向量 A ;将 Zernike 模式系数列向量 A 传输至 GPU 的常量缓存中;

7) 重构被测波前

将预存的根矩阵 B 的数据从显存连续读取到 GPU 的共享内存中,并被自动分配到每一个核处理器中,即多处理器中;核处理器按照步骤“(5)”中的变换关系在计算出其它三个子矩阵 C 、 D 、 E 中的相应矩阵元的同时,按照表达式(1)进行 Z 与 A 的矩阵乘法,即可不断计算出液晶波前校正器各个像素处的波前位相值,并不断输送到显存中,重构出被测波前 Φ 。

3. 根据权利要求 2 所述的用于液晶自适应光学系统的快速波前处理方法,其特征是:

(1) 采用 Zernike 多项式前 36 项,并去掉平面波特性的第一项,即 $j = 1, \dots, 35$,共有 35 个 Zernike 模式;

(2) 所用液晶校正器具有 512×512 个像素,在此像素阵列上做内切圆,限定内切圆为通光截面,圆内包含的像素数 $h = 205892$,每个象限中各有 51473 个像素,每个像素的数据占用 2 个字节,所以根矩阵的数据量为 $51473 \times 35 \times 2$ 字节;

(3) 使用 nVidia 公司生产的 Geforce 9800GTX GPU,具有 16 个统称为多处理器的核处理器,每个多处理器中有 8 个流处理器,流处理器频率 1688MHz,峰值计算速度 $216 \times 10^9/s$ 乘加运算;显存频率 1100MHz,显存位宽 256 位,显存带宽 70.4GB/s;

(4) 选取通光谱段的中心波长 λ 为 785nm,按照步骤 2) 所述的方法建立 Zernike 模式

$$\text{矩阵 } Z = \begin{pmatrix} z_{1,1} & z_{1,2} & \cdots & z_{1,35} \\ z_{2,1} & z_{2,2} & \cdots & z_{2,35} \\ \mathbf{M} & \mathbf{M} & \mathbf{O} & \mathbf{M} \\ z_{205892,1} & z_{205892,2} & \mathbf{L} & z_{205892,35} \end{pmatrix};$$

(5) 按照步骤 3) 所述的方法获得 Zernike 模式矩阵的第一象限子矩阵

$$B = \begin{pmatrix} z_{1,1} & z_{1,2} & \cdots & z_{1,35} \\ z_{2,1} & z_{2,2} & \cdots & z_{2,35} \\ \mathbf{M} & \mathbf{M} & \mathbf{O} & \mathbf{M} \\ z_{51473,1} & z_{51473,2} & \mathbf{L} & z_{51473,35} \end{pmatrix};$$

以第一象限子矩阵 B 为根矩阵, 将根矩阵 B 以列优先的排列顺序存入 GPU 显存中;

(6) 模拟给出一个 Zernike 模式系数列向量 $A = \begin{pmatrix} 1.0 \\ 1.0 \\ \mathbf{M} \\ 1.0 \end{pmatrix}$, 并将 A 传输至 GPU 常量缓存中;

(7) 将预存的根矩阵 B 从显存读取到 GPU 的共享内存中, 按照步骤 7) 所述的方法, 重构出被模拟的位相波前。

适用于液晶自适应光学系统的快速波前重构方法

技术领域

[0001] 本发明属于自适应光学技术领域,涉及大气通道光波前的探测信号到位相数字信号的数据传输与计算,特别是一种基于 Zernike 模式重构波前的快速处理方法,适用于大数据量的液晶自适应光学系统,具体地说是一种适用于液晶自适应光学系统的快速波前重构方法。

背景技术

[0002] 地基望远镜上的自适应波前校正成像系统已成为保障其分辨率的重要设施。液晶波前校正器的驱动单元(像素)数可达百万个,空间校正频率很高,很有希望应用于 10 米以上口径大型望远镜的波前校正自适应光学系统中。但是校正器驱动单元数的增多,会使波前数据处理量增加。尤其液晶波前校正器的像素与波前探测器的子单元不对应,需用 Zernike 多项式拟合探测信号,即在液晶自适应光学系统的控制主机中以液晶波前校正器的像素面阵为波前位相分布的位置坐标系,对应这个位置坐标系,并将 Zernike 多项式每项前面的系数(前置系数)取为 1 个波长,计算出 Zernike 多项式的每一项位相分布,称为 Zernike 多项式相应项的模式波前。这些模式波前数据为预存数据,无需即时处理,但看得出液晶波前校正器的像素越多预存数据量越大。用这些波前模式的线性组合拟合波前探测信号,可以得出被测波前的 Zernike 模式系数列向量 A,然后依据下式的矩阵乘法重构出被测波前位相矩阵 Φ 的表达式:

$$[0003] \quad \Phi = Z \cdot A \quad (1)$$

$$[0004] \quad \text{式中 } Z = \begin{pmatrix} z_{1,1} & z_{1,2} & \cdots & z_{1,k} \\ z_{2,1} & z_{2,2} & \cdots & z_{2,k} \\ \text{M} & \text{M} & \text{O} & \text{M} \\ z_{h,1} & z_{h,2} & \text{L} & z_{h,k} \end{pmatrix} \text{ 为上述预存的 Zernike 模式波前位相矩阵,简称}$$

Zernike 模式矩阵,矩阵元的下角标 k 为列的数目、对应 Zernike 模式的数目, h 为行的数目、对应液晶波前校正器的像素数。通常 k 在 30 ~ 100 之间, h 在 5 万 ~ 100 万之间,因此液晶自适应系统的数据传输与处理量几十倍甚至上百倍于传统使用的变形镜校正器系统。为了使液晶自适应系统的校正速度能够跟上大气湍流波前的变化速度,不但对波前处理机的计算速度要求非常高,而且要求数据传输速度也要非常快。变形镜自适应系统所用的 DSP、FPGA 等专门数据处理器,由于片内高速存储器容量远不够容纳液晶自适应系统的波前数据,需要使用传输速度较慢的片外内存,尽管 DSP 和 FPGA 具有很快的计算速度,但数据传输的瓶颈大大降低了 DSP 和 FPGA 完成计算的速度。如果将 20 片以上的 DSP 芯片集成,是可以解决片内高速存储器容量不够的问题,但集成 DSP 的电路结构复杂,体积庞大,开发周期长,成本极高。目前能够在国外买到的都是集成度在 10 片以下的。因此 DSP、FPGA 很难满足液晶系统的要求,必须选择其它的高速处理机。

[0005] 上述液晶自适应光学系统的矩阵波前位相运算,相当于高密度图片式计算,图形

处理器 (GPU) 是比较适用的专门数据处理器。

[0006] 图形处理器 (GPU) 是一种高度并行化的多线程、多核处理器。目前的 GPU Nvidia Geforce GTX 480 的单精度计算峰值速率达到 1344.96GFOPS。片外有一个足以容下液晶系统数据量的内存 (显存), 其数据传输带宽 177.4GB/s。虽然显存到 GPU 的数据传输速度也不能与 GPU 多核处理器的计算速度匹配, 但这个传输速度已是 DSP 和 FPGA 的几十倍甚至上百倍。所以使用 GPU 进行液晶自适应系统的波前数据处理, 速度更快, 体积又小, 具有很好的应用前景。

发明内容

[0007] 本发明的目的是提供适用于液晶自适应光学系统的快速波前重构方法。

[0008] 本发明考虑到 GPU 的计算速度要比显存到 GPU 的数据传输速度快 4 倍之多, 在数据传输满负荷运转下, GPU 内核处理器的使用效率还不到 25%, 因而提出利用 Zernike 模式的奇偶性使波前数据传输量减少的办法, 使传输时间减少, 同时使 GPU 内的多核处理器正好形成不间断的连续工作状态, 使用效率增加、处理速度加快。

[0009] 本发明利用 Zernike 模式的奇偶性将波前数据传输量减少到原来的四分之一, 与此同时 GPU 内核处理器的数据处理形成不间断的连续流程, 使用效率提升 3 倍, 波前数据处理时间减少至原来的四分之一。

[0010] Zernike 多项式的表达形式分为余弦多项式和正弦多项式, 也就是 Zernike 模式可分成余弦模式和正弦模式, 即

$$[0011] \quad Z_n^m(\rho, \theta) = R_n^m(\rho) \cdot \cos(m\theta) \quad m \leq 0 \quad (2)$$

$$[0012] \quad Z_n^m(\rho, \theta) = R_n^m(\rho) \cdot \sin(m\theta) \quad m > 0 \quad (3)$$

[0013] 其中, 表达式 (2) 为余弦多项式, 表达式 (3) 为正弦多项式。式中下角标 n 为阶数, 只取正整数包括 0, 按照从小到大依次排序。在同一阶 n 中含有角频率数 m 从负到正、从小到大依次排序的模式, m 也只取整数; 而且 $n - |m|$ 为正偶数包括 0。

[0014] 在直角坐标系中余弦多项式 (2) 是关于 y 的偶函数, 且当 m 分别为奇、偶数时, 其多项式是关于 x 的奇、偶函数; 正弦多项式 (3) 是关于 y 的奇函数, 且当 m 分别为奇、偶数时, 其多项式是关于 x 的偶、奇函数。

[0015] 由于余弦多项式 (2) 和正弦多项式 (3) 的奇偶对称性, 对于任一 Zernike 模式, 第一象限 ($x > 0, y > 0$) 上任意一点 $\Phi(x, y)$, 如图 1 所示, 其对应第二象限上一点 $\Phi(-x, y)$ 、第三象限上一点 $\Phi(-x, -y)$ 以及第四象限上一点 $\Phi(x, -y)$, 具有以下关系: 对于 m 为奇数的余弦模式, $\Phi(x, y) = -\Phi(-x, y) = -\Phi(-x, -y) = \Phi(x, -y)$; 对于 m 为偶数的余弦模式, $\Phi(x, y) = \Phi(-x, y) = \Phi(-x, -y) = \Phi(x, -y)$; 对于 m 为奇数的正弦模式, $\Phi(x, y) = \Phi(-x, y) = -\Phi(-x, -y) = -\Phi(x, -y)$; 对于 m 为偶数的正弦模式, $\Phi(x, y) = -\Phi(-x, y) = \Phi(-x, -y) = -\Phi(x, -y)$ 。

[0016] 据此将 Zernike 模式矩阵 Z 对应四个象限分成四个子矩阵, 选择其中一个子矩阵的数据存入显存; 即时做波前重构处理时, 将显存中预存的子矩阵数据传输到 GPU 的共享内存中, GPU 的核处理器利用奇偶对称关系算出其它三个子矩阵上的对称元素; 再根据表达式 (1), 做 Z 与即时测得的被测波前的 Zernike 模式系数列向量 A 的矩阵乘法, 重构出对应液晶波前校正器上各个像素处的波前位相值。

[0017] GPU 的计算是与显存中子矩阵数据的读取并行的,从而可节省四分之三的时间重构出整个波前。

[0018] 为更好地理解本发明,详述操作步骤如下:

[0019] 1) 确定 Zernike 模式数

[0020] 采用 Zernike 多项式的前 $k+1$ 项,并去掉平面波特性的第一项,共有 k 个 Zernike 模式,即 z_{ij} 中的 $j = 1, \dots, k$; j 是表示第几列, i 是表示第几行。

[0021] 2) 建立 Zernike 模式矩阵

[0022] 首先将液晶波前校正器的像素面阵,按如图 1 所示分为直角坐标系的四个象限,限定该圆为通光截面,圆内包含 h 个像素;通光谱段的中心波长 λ 确定后,建立对应这个圆

面上像素位置的 Zernike 模式矩阵 $Z = \begin{pmatrix} z_{1,1} & z_{1,2} & \dots & z_{1,k} \\ z_{2,1} & z_{2,2} & \dots & z_{2,k} \\ M & M & O & M \\ z_{h,1} & z_{h,2} & L & z_{h,k} \end{pmatrix}$, z_{ij} 中的 $i = 1, 2, \dots,$

h 。 i 的数字顺序:首先是按照象限顺序由第一象限、第二象限、第三象限依次排到第四象限。在第一象限中行顺序是从下到上,然后每行中从左到右 i 相应增大,在该象限中 $i = 1, 2, \dots, h/4$;第二象限中 i 的行顺序与第一象限的相同,但每行中 i 是从右到左相应增大,在该象限中 $i = 1+h/4, 2+h/4, \dots, h/2$;第三象限中行顺序是从上到下排序,每行中 i 的顺序如同第二象限那样从右到左相应增大,在该象限中 $i = 1+h/2, 2+h/2, \dots, 3h/4$;第四象限中行顺序如同第三象限那样从上到下排序,每行中 i 的顺序如同第一象限那样从左到右相应增大,在该象限中 $i = 1+3h/4, 2+3h/4, \dots, h$ 。

[0023] 3) 划分 Zernike 模式矩阵的子矩阵

[0024] 将 Zernike 模式矩阵按照四个象限分成四个子矩阵,即 $Z = \begin{pmatrix} B \\ C \\ D \\ E \end{pmatrix}$;其中第一象限子

矩阵 B 为: $B = \begin{pmatrix} z_{1,1} & z_{1,2} & \dots & z_{1,k} \\ z_{2,1} & z_{2,2} & \dots & z_{2,k} \\ M & M & O & M \\ z_{h/4,1} & z_{h/4,2} & L & z_{h/4,k} \end{pmatrix}$,

[0025] 第二象限子矩阵 C 为: $C = \begin{pmatrix} z_{1+h/4,1} & z_{1+h/4,2} & \dots & z_{1+h/4,k} \\ z_{2+h/4,1} & z_{2+h/4,2} & \dots & z_{2+h/4,k} \\ M & M & O & M \\ z_{h/2,1} & z_{h/2,2} & L & z_{h/2,k} \end{pmatrix}$,

$$[0026] \quad \text{第三象限子矩阵 } D \text{ 为: } D = \begin{pmatrix} z_{1+h/2,1} & z_{1+h/2,2} & \cdots & z_{1+h/2,k} \\ z_{2+h/2,1} & z_{2+h/2,2} & \cdots & z_{2+h/2,k} \\ \mathbf{M} & \mathbf{M} & \mathbf{O} & \mathbf{M} \\ z_{3h/4,1} & z_{3h/4,2} & \mathbf{L} & z_{3h/4,k} \end{pmatrix},$$

$$[0027] \quad \text{第四象限子矩阵 } E \text{ 为: } E = \begin{pmatrix} z_{1+3h/4,1} & z_{1+3h/4,2} & \cdots & z_{1+3h/4,k} \\ z_{2+3h/4,1} & z_{2+3h/4,2} & \cdots & z_{2+3h/4,k} \\ \mathbf{M} & \mathbf{M} & \mathbf{O} & \mathbf{M} \\ z_{h,1} & z_{h,2} & \mathbf{L} & z_{h,k} \end{pmatrix},$$

[0028] 四个子矩阵均为 $h/4$ 行 k 列。

[0029] 4) 向显存中预存根矩阵的数据

[0030] 四个子矩阵中的任意一个都可作为根矩阵,这里使用第一象限子矩阵 B 为根矩阵;按照列优先顺序、即按照 $z_{1,1}, z_{2,1}, z_{3,1}, \dots, z_{h/4,k}$ 的顺序将 B 矩阵数据存入显存中,成为预存数据。

[0031] 5) 求出 B 与 C 、 D 、 E 之间的变换关系

[0032] 如果 B 的第 j 列为余弦 Zernike 模式且角频率数 m 为奇数,则 $C_j = -B_j, D_j = -B_j, E_j = B_j$,其中 B_j, C_j, D_j, E_j 分别代表相应矩阵的第 j 列列向量;如果第 j 列余弦 Zernike 模式的角频率数 m 为偶数,则 $C_j = B_j, D_j = B_j, E_j = B_j$;如果 B 的第 j 列为正弦 Zernike 模式且角频率数 m 为奇数,则 $C_j = B_j, D_j = -B_j, E_j = -B_j$;如果第 j 列正弦 Zernike 模式的角频率数 m 为偶数,则 $C_j = -B_j, D_j = B_j, E_j = -B_j$;将 B 与 C 、 D 、 E 之间的变换关系程序存入 GPU 的共享内存中。

[0033] 6) 波前探测与被测波前的 Zernike 模式系数列向量 A 的获得

[0034] 通过哈特曼波前探测器测得入射波前的信号矩阵;此矩阵经控制主机的处理转换为被测波前的 Zernike 模式系数列向量 A ;将 Zernike 模式系数列向量 A 传输至 GPU 的常量缓存中。

[0035] 7) 重构被测波前

[0036] 将预存的根矩阵 B 的数据从显存连续读取到 GPU 的共享内存中,并被自动分配到各个核处理器中,GPU 的基本结构以及与显存的通讯方法如图 2 所示,其中的“多处理器”即为核处理器。核处理器按照步骤“(5)”中的变换关系在计算出其它三个子矩阵 C 、 D 、 E 中的相应矩阵元的同时、按照表达式 (1) 进行 Z 与 A 的矩阵乘法,即可不断计算出液晶波前校正器各个像素处的波前位相值,并不断输送到显存中,重构出被测波前 Φ 。

[0037] 实际上 GPU 进行波前重构处理所需的时间近似等于从显存连续读取根矩阵 B 的时间。由于数据传输量减少到原来的四分之一,GPU 内核处理器的使用效率提升 3 倍,使波前重构时间理论上可减少至原来的四分之一。

附图说明

[0038] 图 1 是 Zernike 模式在四个象限的对称性示意图。

[0039] 图 2 是 GPU 的结构以及与显存的通讯方法示意图。

[0040] 图 3 是液晶校正器像素分布示意图。

具体实施方式

[0041] (1) 采用 Zernike 多项式前 36 项, 并去掉平面波特性的第一项, 即令 $j = 1, \dots, 35$, 共有 35 个 Zernike 模式;

[0042] (2) 所用液晶校正器具有 512×512 个像素, 在此像素阵列上做内切圆, 如图 3, 限定该圆为通光截面, 圆内包含的像素数 $h = 205892$, 每个象限中各有 51473 个像素, 每个像素的数据占用 2 个字节, 所以根矩阵的数据量为 $51473 \times 35 \times 2$ 字节;

[0043] (3) 使用通常的 GPU, 如 nVidia 公司生产的 Geforce 9800GTX GPU, 其结构及与显存的通讯方式与图 2 完全相符, 它有 16 个称为“多处理器”的核处理器, 每个多处理器中有 8 个流处理器, 流处理器频率 1688MHz, 峰值计算速度 $216 \times 10^9/s$ 乘加运算; 显存频率 1100MHz, 显存位宽 256 位, 显存带宽 70.4GB/s;

[0044] (4) 通光谱段的中心波长 λ 选为 785nm, 按照“详述操作步骤”中“2)”所述的方法建立 Zernike 模式矩阵 $Z =$

$$Z = \begin{pmatrix} z_{1,1} & z_{1,2} & \dots & z_{1,35} \\ z_{2,1} & z_{2,2} & \dots & z_{2,35} \\ \mathbf{M} & \mathbf{M} & \mathbf{O} & \mathbf{M} \\ z_{205892,1} & z_{205892,2} & \mathbf{L} & z_{205892,35} \end{pmatrix};$$

[0045] (5) 按照“详述操作步骤”中“3)”所述的方法获得 Zernike 模式矩阵的第一象限

$$\text{子矩阵 } B = \begin{pmatrix} z_{1,1} & z_{1,2} & \dots & z_{1,35} \\ z_{2,1} & z_{2,2} & \dots & z_{2,35} \\ \mathbf{M} & \mathbf{M} & \mathbf{O} & \mathbf{M} \\ z_{51473,1} & z_{51473,2} & \mathbf{L} & z_{51473,35} \end{pmatrix}; \text{以第一象限子矩阵 } B \text{ 为根矩阵, 将根矩阵 } B$$

以列优先的排列顺序存入 GPU 显存中;

[0046] (6) 模拟给出一个 Zernike 模式系数列向量 $A = \begin{pmatrix} 1.0 \\ 1.0 \\ \mathbf{M} \\ 1.0 \end{pmatrix}$, 并将 A 传输至 GPU 常量缓存

中;

[0047] (7) 将预存的根矩阵 B 从显存读取到 GPU 的共享内存中, 按照“详述操作步骤”中“7)”所述的方法, 重构出被模拟的位相波前。

[0048] 上述过程在 Geforce 9800GTX GPU 上的处理时间为 0.16ms; 如果不按照象限分块处理, 处理时间为 0.49ms。说明上述方法可以有效提高 GPU 的波前重构速度。

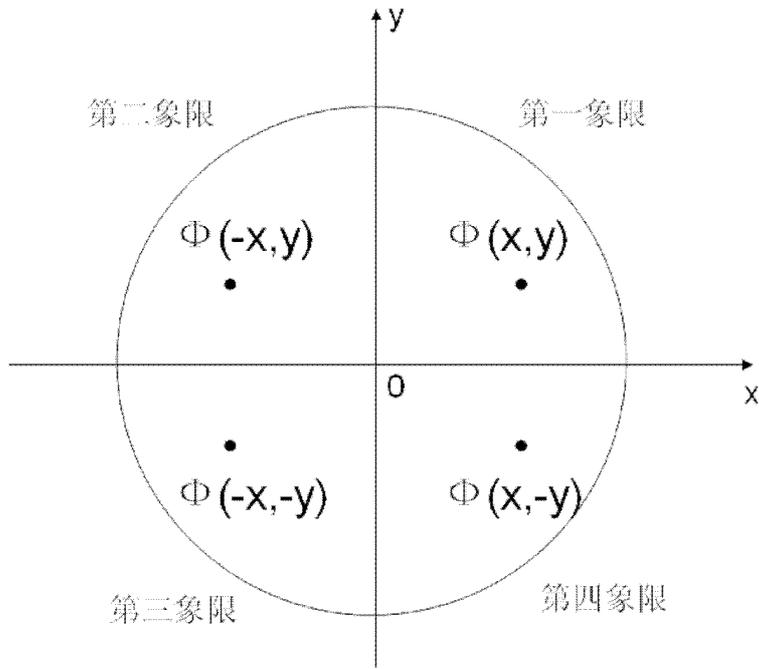


图 1

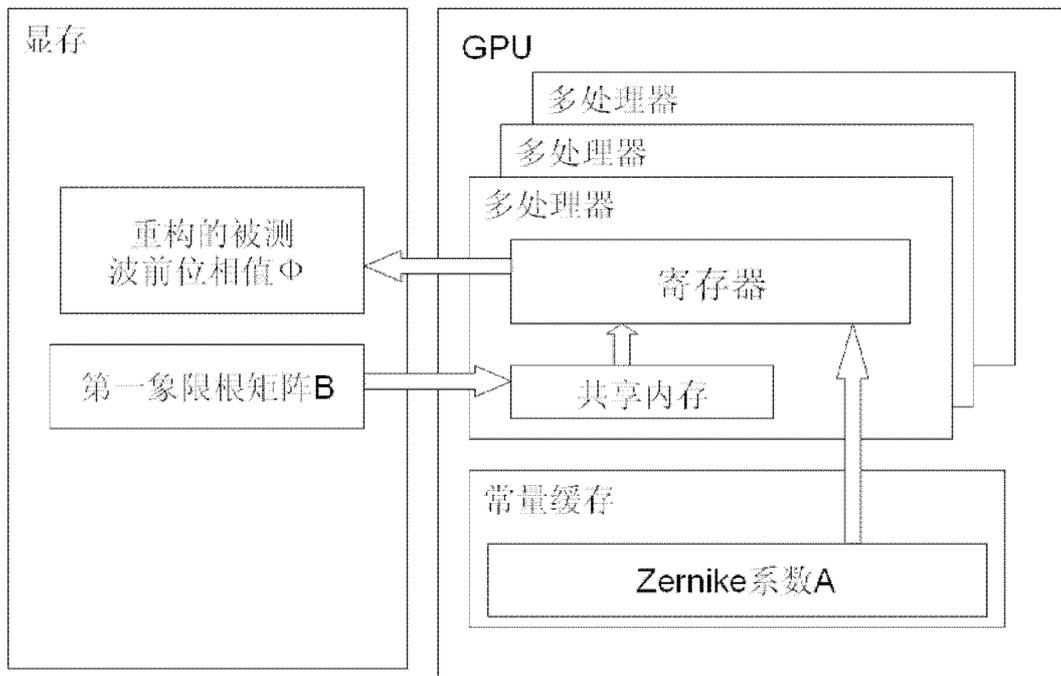


图 2

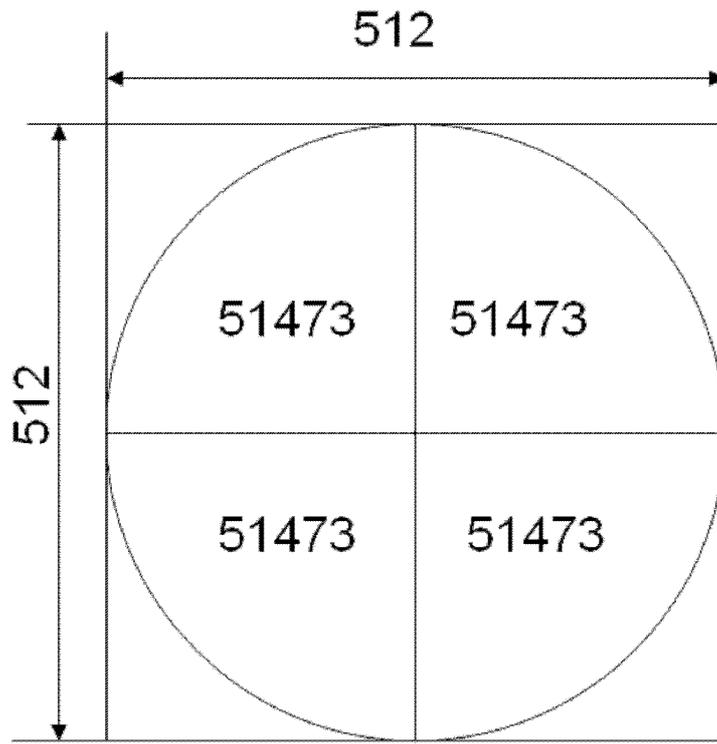


图 3