

文章编号 1004-924X(2011)03-0501-07

基于累加器的哈特曼-夏克波前斜率处理器

樊志华^{1,2,3}, 王春鸿^{1,2}, 姜文汉^{1,2}

(1. 中国科学院 光电技术研究所 自适应光学研究室, 四川 成都 610209;

2. 中国科学院 自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209; 3. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要:在硬件资源有限的情况下,为了支持尽可能多的子孔径进行实时波前斜率处理,提出了一种基于累加器的波前斜率处理器。该处理器的运算核心是子光斑质心计算模块,根据二维图像矩计算的可分解性以及一维矩的递推累加求解方法,用加法运算代替子孔径坐标与像素灰度的乘法运算,获得灰度重心法所需的所有二维低阶矩。该模块仅由 5 个累加器组成,硬件实现时避免了乘法器的使用,降低了资源消耗。仿真实验结果表明:对于 22×22 方形排布的哈特曼-夏克波前传感器图像,本文的结构可在 FPGA 内实现;在 100 MHz 的工作频率下,完成一帧所有子孔径斜率计算的延迟时间为 $0.33 \mu\text{s}$,计算误差 $< 0.002 \text{ pixel}$;与传统的波前斜率处理器相比,其逻辑资源消耗减小了 40% 左右。所提出的结构能够在不增加额外资源的情况下,通过对原波前斜率处理器进行升级来完成,其支持的子孔径数目增加 1 倍左右,实现了波前斜率的高速、高精度提取。

关键词:自适应光学; Shack-Hartmann 传感器; 灰度重心法; 几何矩; 波前斜率处理

中图分类号: TP212.14; O439 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111903.0501

Accumulator-based wavefront slope processor for Shack-Hartmann sensors

FAN Zhi-hua^{1,2,3}, WANG Chun-hong^{1,2}, JIANG Wen-han^{1,2}

(1. *Laboratory on Adaptive Optics, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;*

2. *Key Laboratory on Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;*

3. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)*

Abstract: In order to accommodate as many subapertures as possible in the high-speed wavefront slope calculation when hardware resources were limited, an accumulator-based wavefront slope processor was proposed. The computational core of the processor is an array of subaperture spot centroid calculating element. According to the decomposition of 2D moment calculation and the recursive procedure of 1D moment calculation, it can substitute the multiplications between the pixel grayvalues and its coordinates with several sum operations to obtain the low order 2D geometric moments required in centroiding. The calculating element simply consists of five accumulators, and the cost has been decreased because no multipliers are needed. Experimental results indicate that when it is implemented in a Field Programmable Gate Array(FPGA) at a clock frequency of 100 MHz, the proposed architecture can obtain gradients of all subapertures in 22×22 Shack-Hartmann with the latency no more than

收稿日期: 2010-06-30; 修订日期: 2010-08-06.

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(No. KG CX2-Y11-920); 国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2008AA02Z422)

0.33 μs and the error less than 0.002 pixel. The new design has reduced the hardware resource by 40% as compared to that of the multiplier-based architecture. Furthermore, the original multiplier-based processor can be updated for Shack-Hartmann sensors and can obtain the subapertures twice as much as that of original one without additional hardware resources. It realizes the high speed measurement of wavefront with a high accuracy.

Key words: adaptive optics; Shack-Hartmann sensor; gray gravity; geometric moment; wavefront slope processing

1 引言

哈特曼-夏克传感器是目前应用最广泛的波前传感器^[1-2],通常由微透镜阵列与 CCD 相机组成。阵列微透镜用于对波前进行分割采样,在 CCD 靶面上形成一个光斑阵列,但波前畸变会造成子孔径光斑漂移,需通过计算各个子光斑的质心位置来确定该子光斑偏离其标定位置的漂移量,从而得到子孔径范围的局部波前斜率。

灰度重心法常用来确定子光斑的质心位置^[3-4],文献[5-6]根据灰度重心的定义设计了基于乘法器的子光斑质心计算模块,并以该模块为基础构造了多个通道,并行地计算各个子孔径的局部波前斜率,从而实现动态波前畸变的高速测量。为了尽可能地提高波前斜率计算的实时性,要求处理通道的数目与哈特曼-夏克传感器的一个子孔径行的最大子孔径数目相同。

为了获得更高的动态波前测量空间分辨力,哈特曼-夏克传感器的子孔径数目越来越多,例如 ELTs (Extremely Large Telescopes) 自适应光学系统的探测器可以支持高达 210×210 的子孔径布局^[7]。但子孔径数目的巨大,增加了处理通道的数量,也极大地增加了实现实时波前斜率处理的难度。由于每个处理通道都由一个子光斑质心计算模块构成,减少质心计算模块的资源消耗,即能够有效地减少波前斜率处理器的实现成本,尤其当所需通道数目巨大时,可以降低波前斜率处理器的实现难度。

目前,实时系统中的图像灰度重心快速算法受到研究人员的广泛关注,文献[8]运用格林理论,把对图像的求质心转化为对图像边缘求一维积分,有效地减少了乘法运算量;文献[9]把图像函数转化为特殊函数,利用该函数特性简化运算;而文献[10]则把图像求矩看作两个函数数组,分

别对两个数组求差分和求累加,然后用变换后的函数数组乘积代替原来函数的乘积,使得乘法次数减少到仅仅 3 次。上述方法有效地提高了质心计算的效率,但是,在硬件实现时无法避免乘法器的使用。

实际上,灰度重心计算所涉及的乘法运算主要是像素灰度与坐标的乘积,这可以通过对该像素灰度的多次累加得到。本文提出了一种基于累加器的灰度重心法,它用加法运算代替坐标与像素灰度的乘法运算,把二维图像矩运算转化为两次级联的一维矩计算,并通过递推累加方法获得灰度重心法所需的全部低阶矩。整个过程没有乘法运算,因此,在硬件实现时避免了乘法器的使用,有效地降低了资源消耗。以基于累加器的质心计算模块作为基本单元,采用并行技术和流水线技术,设计了基于累加器的多通道波前斜率处理器,与传统的基于乘法器的波前斜率处理器相比,本文的设计在不降低实时性和运算精度的条件下,极大地降低了资源消耗,而且随着子孔径数目的增加,其优势更为明显。

2 灰度重心法

2.1 灰度重心法定义

子光斑的偏离标定位置的漂移量可以通过计算其灰度重心得到的,灰度重心可以看成以像素灰度为权值的加权型重心法,其计算公式为

$$X_c = \frac{\sum_{ij} i \cdot S_{ij}}{\sum_{ij} S_{ij}}, Y_c = \frac{\sum_{ij} j \cdot S_{ij}}{\sum_{ij} S_{ij}}, \quad (1)$$

其中 X_c 和 Y_c 是质心位置, i 和 j 是每个像素的坐标,而 S_{ij} 是 CCD 的输出信号,即像素灰度信息。CCD 相机将图像信号 S_{ij} 逐行逐像素地输出,观察式(1)可知, X 方向和 Y 方向的质心计算是相互独立的,可以并行实现,因此,可以设计两

组运算单元同时进行这两个方向的质心运算。以 X 方向上的灰度重心计算过程为例,其处理单元^[6]主要包括乘法单元,累加单元以及除法单元。

2.2 基于累加器的灰度重心法

子光斑的质心计算所需的二维零阶矩 m_{00} 和二维一阶矩 m_{10}, m_{01} 的数学表达式为

$$\begin{cases} m_{00} = \sum_{i,j=1}^{M,N} S_{ij} = \sum_{i=1}^M M_{i0} = \sum_{i=1}^M (\sum_{j=1}^N S_{ij}) \\ m_{10} = \sum_{i,j=1}^{M,N} j \cdot S_{ij} = \sum_{i=1}^M M_{i1} = \sum_{i=1}^M (\sum_{j=1}^N j \cdot S_{ij}) \\ m_{01} = \sum_{i,j=1}^{M,N} i \cdot S_{ij} = \sum_{i=1}^M (i \cdot M_{i0}) = \sum_{i=1}^M (i \cdot \sum_{j=1}^N S_{ij}) \end{cases} \quad (2)$$

式中 M 表示子光斑图像的行数, N 表示子光斑图像的列数,而 M_{i0}, M_{i1} 分别表示第 i 行数据的零阶矩和一阶矩,可以看出这些二维低阶矩都可以分解为两个一维的低阶矩进行计算,其分解过程如图 1 所示。可以看出,所有二维矩的计算都分为两步进行:(1)计算各行图像数据的一维矩,得到矩的数组;(2)计算矩的数组的一维矩,得到图像的二维矩值。先计算图像每一行的一维零阶矩 M_{i0} ,而后对所有一维零阶矩 $M_{i0} (i=1, 2, \dots, M)$ 再计算一次一维零阶矩就能求出二维零阶矩 m_{00} ;同样地,可以计算出质心运算所需的另外两个二维矩 m_{10} 和 m_{01} 。通过把二维矩运算分解为两个级联的一维矩运算,减少了乘法次数,有效降低了运算量。

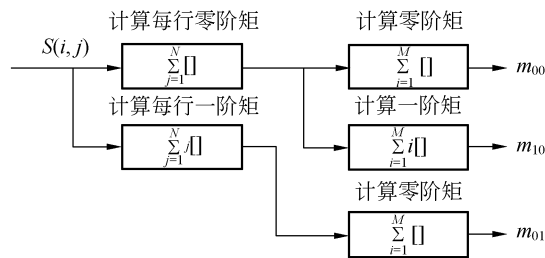


图 1 二维低阶矩计算示意图

Fig. 1 Schematic diagram of 2 D low order moment calculation

通过上述的运算分解,质心计算所需的所有二维低阶矩的运算只需要计算一维零阶矩 M_{i0} 和一维一阶矩 M_{i1} ,其中 M_{i0} 只包括加法运算,而 M_{i1} 涉及与子孔径坐标的乘法运算。实际上, M_{i0} 可以通过递推累加的方式得到, M_{i1} 则可以利用其累加

的中间结果通过递推求和的方式得到^[11-12],从而避免了其中的乘法运算。例如,计算第 i 行的零阶矩 M_{i0} :

$$M_{i0} = \sum_{j=1}^N S_{ij} \quad (3)$$

使用递推求和:

$$M_{i0}(j) = M_{i0}(j-1) + S_{i(N-j+1)} \quad (4)$$

M_{i0} 的初值为 0。

一阶矩 M_{i1} :

$$M_{i1} = \sum_{j=1}^N j \cdot S_{ij} \quad (5)$$

也可以通过递推方式计算。 M_{i1} 与 M_{i0} 的关系可以表示为:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^N j \cdot S_{ij} &= \sum_{j=2}^N (j-1) S_{ij} + \sum_{j=1}^N S_{ij} = \\ &= \sum_{j=3}^N (j-2) S_{ij} + \sum_{j=2}^N S_{ij} + \sum_{j=1}^N S_{ij} = \\ &= S(N) + (S(N) + S(N-1)) + \dots + \\ &= \sum_{j=3}^N S_{ij} + \sum_{j=2}^N S_{ij} + \sum_{j=1}^N S_{ij} = \\ &= M_{i0}(1) + M_{i0}(2) + \dots + M_{i0}(N-2) + \\ &= M_{i0}(N-1) + M_{i0}(N) = \sum_{j=1}^N M_{i0}(j) \end{aligned} \quad (6)$$

这样就避免了像素与坐标的乘法运算,由此可知, M_{i1} 的递推公式为

$$M_{i1}(j) = M_{i1}(j-1) + M_{i0}(j) \quad (7)$$

式中的初值为 0。可以看出,每一个新数据 S_{ij} 到来,通过累加得到 $M_{i0}(j)$,同时对其进行累加得到 $M_{i1}(j)$,实现对应数据与坐标的乘积运算。当一行数据输入完成,就得到该行数据的一维零阶矩 M_{i0} 和一维一阶矩 M_{i1} 。表 1 给出了常规灰度重心法和本文方法的运算量,可见这种递推累加求矩的方法只有加法运算,其运算量远小于常规方法。

表 1 两种方法的运算量比较

Tab. 1 Computation comparison of two methods

Methods	Conventional method	Proposed method
Sum	3MN	2MN+3M
Multiplication	2MN	0

2.3 基于累加器的灰度重心模块设计

根据 CCD 相机逐行逐像素串行输出数据的特点,结合二维矩的分解原理以及一维矩的递推

累加计算方法,提出了基于累加器的低阶矩计算模块,其结构如图 2 所示。该模块由 1 个协处理器和 5 个累加器 $Acc_0 \sim Acc_4$ 构成。协处理器根据输入的同步时钟信号,产生这些累加器的使能信号与复位信号,控制这些累加器的有序工作。累加器 Acc_0 负责第 i 行图像数据的零阶矩 M_{i0} 的累加;累加器 Acc_1 负责每行数据一阶矩 M_{i1} 的累加;当一行数据输出完成后,对这两个累加器复位,为下一行数据的累加做准备。在每行数据输出完成时,累加器 Acc_2, Acc_3 分别对 Acc_0 和 Acc_1 的数据进行累加求和,同时,累加器 Acc_4 累加 Acc_2 中的数据。当最后一行数据输出完成时,累加器 Acc_2, Acc_3 和 Acc_4 分别输出质心运算所需的图像二维矩 m_{00}, m_{10} 和 m_{01} 。

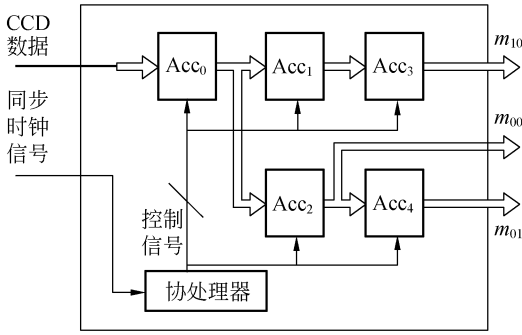


图 2 基于累加器的低阶矩求解结构

Fig. 2 Architecture of accumulator-based low order moment calculation

图 3 为基于累加器的低阶矩计算模块在 Moldsim 平台下的测试结果,其中 FV_SUB 是子孔径有效信号, LV_SUB 是子孔径每行的有效信号, VAL_Moment 表示低阶矩有效输出标志信号。可见所有累加器可正确有序地工作,在一个子孔径所有数据输出完成后,仅仅经过 3 个时钟周期即可求出质心运算所需的 3 个低阶矩,保证了质心运算的实时性。

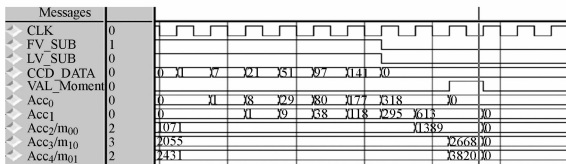


图 3 测试结果

Fig. 3 Experimental waveform

3 基于累加器的波前斜率处理器结构

3.1 哈特曼-夏克波前传感器图像

图 4 是哈特曼-夏克波前传感器常用的子孔径布局图,其微透镜阵列呈 8×8 方形排布,每个子孔径图像大小都相同,一行最多包含 8 个子孔径,一共有 48 个有效子孔径。成像传感器通常采用 CCD 相机,每个微透镜都会在 CCD 靶面上的对应区域形成一个子光斑。线阵 CCD 逐行逐像素地输出图像数据,以图 4 为例,先依次输出 1, 2, 3, 4 号子孔径第一行像素值,然后输出第二行数据,依此类推。当第一个子孔径行的所有子孔径数据输出完毕后,又重新开始输出下一个子孔径行的图像数据,直到所有子孔径数据输出完成。在实际应用中,为了获得更高的波前检测精度,往往需要更多的子孔径数目。

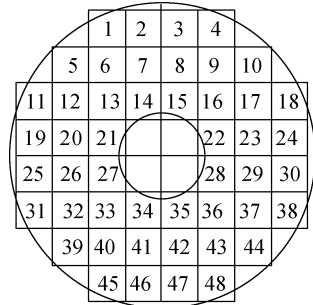


图 4 哈特曼-夏克波前传感器子孔径布局图

Fig. 4 Diagram of Shack-Hartmann sensor

3.2 基于累加器的波前斜率处理器

多通道技术^[5,13]是实时处理哈特曼-夏克传感器子孔径图像的常用方法,通过构造功能相同的若干处理通道,对一个子孔径行上的各个子孔径数据实现并行处理,使得一个子孔径行的处理延时减小为一个子孔径的处理延时。本文提出的基于累加器的波前斜率处理器,其结构如图 5 所示。为了获得最佳的实时性能,该结构由 N 个处理通道构成,并要求通道数目与子孔径行上的最大子孔径数量相同。与常规的波前斜率处理器不同,其每个通道由基于累加器的低阶矩计算模块构成,在 CCD 时钟信号的同步控制下,每个通道只对属于自己子孔径范围的图像数据进行处理,通过累加获得子光斑质心运算所需的 3 个低阶矩。当一个子孔径行数据输出完成后,这 N 个通

道依次顺序地输出该子孔径行上各子孔径图像的低阶矩,这些低阶矩通过锁存器输出到数据总线上,流水地得到每一个子光斑的质心位置。

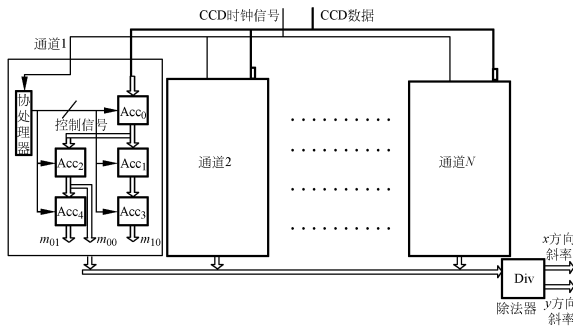


图 5 基于累加器的波前斜率处理器结构

Fig. 5 Architecture of accumulator-based wavefront slope processor

由于是用累加器代替乘法器来构造基本处理通道,所以,本文的波前斜率处理器减少了资源消耗。表 2 给出了 8×8 子孔径排布的哈特曼-夏克传感器波前斜率处理器的资源对比。在 Xilinx 的 FPGA 芯片 xc3s250e 上,一个乘法器大概消耗 21 个 slices,而一个累加器的消耗为 10 个 slices,可见基于累加器的结构所占用的资源将远小于基于乘法器的结构,这种优势随着哈特曼-夏克传感器子孔径数目的增加而更为明显。

表 2 两种波前处理器的资源消耗对比

Tab. 2 Resource consumption comparison of two wavefront processors

Methods	Conventional architecture	Proposed architecture
Accumulator	24	40
Counter	16	0
Multiplier	16	0
Divider	2	2

4 实验结果

波前斜率处理器的速度与精度决定了波前探测的性能。图 6 是哈特曼-夏克传感器图像,该传感器子孔径布局为 22×22,每个子孔径大小为 17 pixel×19 pixel,CCD 有效靶面大小为 374×418。采用根据上述参数设计的基于累加器的波前斜率处理器,分别验证了该结构的实时性和子光斑的计算精度。

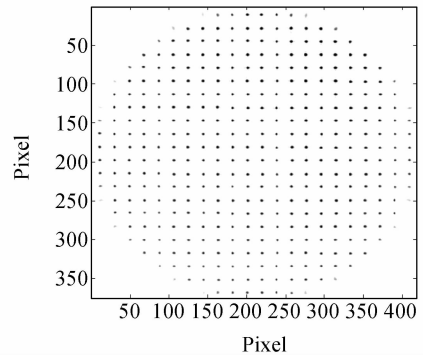


图 6 哈特曼-夏克传感器图像

Fig. 6 Experimental image of Shack-Hartmann wavefront sensor

4.1 实时性

基于累加器的波前斜率处理器是在 FPGA 芯片内实现的,在 Moldsim 平台下的测试结果如图 7 所示。图中 FV, LV 分别表示哈特曼-夏克图像的帧有效信号和行有效信号; VAL_Center 表示各子孔径波前斜率的有效输出信号;而 POS_ROW, ROW_Fra, POS_COLUMN 以及 COLUMN_Fra 分别表示子光斑质心位置在纵向和横向的整数和小数部分。可以看出,在 100 MHz 的时钟频率下,本结构在图像数据输出完成后 0.33 μs 就能输出所有子孔径的波前斜率值。如提高工作频率还可以进一步减小处理过程中的延时。

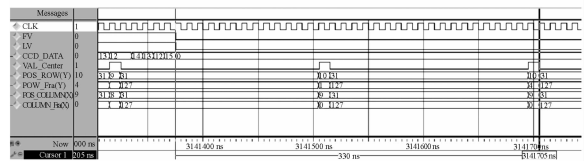


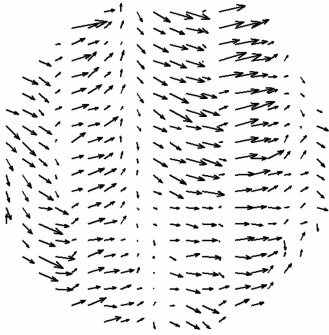
图 7 基于累加器的波前斜率处理器的测试结果

Fig. 7 Experiment waveform of accumulator-based wavefront slope processor

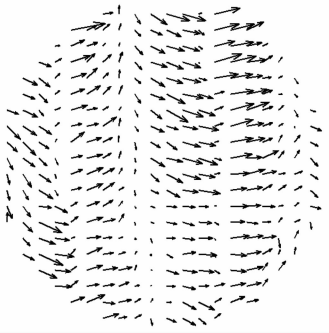
4.2 运算精度

图 8 是哈特曼-夏克图像中的有效子孔径波前斜率分布图,箭头方向表示该子孔径斜率的方向,箭头的长度正比于该子孔径平均斜率的幅值。图 8(a)是子光斑质心偏移分布的真实值,是由传统的灰度重心法在 matlab 平台上得到的;而图 8(b)是采用本文提出的方法在 moldsim 平台上得到的,在 X 方向上的计算误差均值为 1.4×10^{-6} 。

pixel, 标准差为 1.5×10^{-3} pixel, 在 Y 方向上的误差均值为 2.1×10^{-5} pixel, 标准差为 1.6×10^{-3} pixel, 这是定点运算引入的量化误差。



(a) 真实的子光斑质心偏移图
(a) True spot centroid offsets



(b) 本文方法得到的子光斑质心偏移图
(b) Estimated spot centroid offsets by proposed method

图 8 子光斑质心偏移图

Fig. 8 Spot centroid offsets

4.3 资源消耗

比较基于乘法器的波前斜率处理器与基于累

加器的波前斜率处理器所消耗的 FPGA 硬件资源, 这些数据是由 ISE11.1 软件综合报告生成的。由表 3 可知, 本文结构所消耗的资源仅仅为基于乘法器的波前斜率处理器的 60% 左右。

表 3 资源消耗对比

Tab. 3 Resource consumption comparison

Methods	Multiplier-based	Accumulator-based	Ratio
	wavefront slope processor	wavefront slope processor	
Slices	2202	1456	66.1%
LUTs	4217	2834	67.2%

5 结 论

本文提出了一种基于累加器的波前斜率处理器。该处理器采用多通道并行技术实时地计算哈特曼-夏克图像各子孔径的波前斜率, 其核心是子光斑质心计算模块, 把二维图像矩的计算分解为两次级联的一维矩运算, 用递推方式实现质心运算所需的低阶矩求解, 最终避免了乘法器的使用, 减小了资源消耗, 同时保持了较高的处理速度。仿真和实验图像验证了该处理器在 100 MHz 的工作频率下, 处理一帧图像数据的延迟时间仅仅为 $0.33 \mu\text{s}$, 满足自适应光学系统苛刻的实时要求, 其计算误差小于 0.002 pixel。与传统的基于乘法器的波前斜率处理器相比, 本文的结构所消耗的逻辑资源减少为原来的 60% 左右, 而且随着哈特曼-夏克传感器子孔径数目越来越多, 本文的结构更具优势。

参考文献:

- [1] 程少园, 曹召良, 胡立发, 等. 离轴反射式人眼视网膜成像自适应光学系统设计[J]. 光学精密工程, 2010, 18(3):609-614.
CHEN SH Y, CAO ZH L, HU L F, *et al.*. Design of reflective off-axis adaptive optical system for human retinal imaging[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(3):609-614. (in Chinese)
- [2] 李华强, 宋贺伦, 饶长辉, 等. 增大夏克-哈特曼波前传感器动态测量范围的方法[J]. 光学精密工程,

2008, 16(7):1203-1207.

LI H Q, SONG H L, RAO CH H, *et al.*. Extrapolation method to extend dynamic range of Shack-Hartmann wave-front sensor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(7):1203-1207. (in Chinese)

- [3] 王海涌, 黄江艳. CCD 视频幅值调节器的设计及目标精确定位算法[J]. 光学精密工程, 2008, 16(6):1105-1109.

WANG H Y, HUANG J Y. Design of CCD video amplitude controller and target precise locating algorithm[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(6):1105-

1109. (in Chinese)
- [4] HARDY J W. *Adaptive Optics for Astronomical Telescopes* [M]. New York: Oxford University Press, 1998.
- [5] 周璐春,王春鸿. 基于FPGA技术的波前斜率处理方法[J]. 光电工程, 2002, 29(3): 28-31.
ZHOU L CH, WANG CH H. A wavefront slope processing method based on FPGA technique [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2002, 29(3): 28-31. (in Chinese)
- [6] 唐端午. 基于脉动阵列的实时波前处理机原理验证[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2008.
TANG D W. *Principle validation of the wavefront processor based on systolic array* [D]. Beijing: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, 2008. (in Chinese)
- [7] RODRÍGUEZ RAMOS L F. FPGA - based slope computation for ELTs adaptive optics wavefront sensors[J]. *SPIE*, 2008, 7015(701530): 1-11.
- [8] LUREN Y, FRITZ A. Fast computation of Cartesian geometric moments using discrete Green's theorem[J]. *Pattern Recognition*, 1996, 29(7): 1061-1073.
- [9] BALKASIM S, MOHAMED K. Fast computation of 2-D image moments using biaxial transform [J]. *Pattern Recognition*, 2001, 34(9): 1867-188.
- [10] 王冰, 职秦川. 灰度图像质心快速算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2004, 16(10): 1360-1365.
WANG B, ZHI Q C. Computation of center of mass for gray level image based on differential moments factor[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2004, 16(10): 1360-1365. (in Chinese)
- [11] HATAMIAN B. Moment calculations by digital filters [J]. *AT & T Bell Laboratories Technical Journal*, 1984, 63: 217-229.
- [12] HATAMIAN M. A real time two-dimensional moment generating algorithm and its single chip implementation [J]. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1986, 34: 546-553.
- [13] 彭晓峰, 李梅, 饶长辉. 基于绝对差分算法的相关HS波前处理机设计[J]. 光电工程, 2008, 35(12): 18-22.
PENG X F, LI M, RAO C H. Design of correlating hartmann-shack wavefront processor based on absolute difference algorithm [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, 35(12): 18-22.

作者简介:



樊志华(1981—),男,天津人,博士研究生,2006年于四川大学获得学士学位,主要从事自适应光学波前实时处理技术的研究。E-mail: zhifine@126.com

导师简介:



王春鸿(1976—),男,四川蒲江人,研究员,硕士生导师,主要从事自适应光学系统实时数字信号处理和计算机控制方面的研究。E-mail: wangchunhong@ioe.ac.cn



姜文汉(1936—),男,浙江平湖人,中国工程院院士,研究员,博士生导师,1958年毕业于哈尔滨工业大学,现任中科院光电技术研究所学术委员会主任、中科院自适应光学重点实验室主任,主要从事自适应光学技术及系统应用的基础研究。E-mail: adopse@ioe.ac.cn