

# 增大夏克-哈特曼波前传感器动态范围的算法研究

张金平<sup>1,2</sup> 张忠玉<sup>1</sup> 张学军<sup>1</sup> 李锐钢<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所光学系统先进制造技术重点实验室, 吉林 长春 130033)

(<sup>2</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要** 为了保证夏克-哈特曼波前传感器具有高灵敏度的同时又具有较大的动态范围, 提出了一种能够有效增大传感器动态范围的数据处理方法——光斑归位法。该方法使不规则的光斑回归到各自原来的位置, 形成一个规则的光斑阵列, 找到光斑阵列中某个光斑与微透镜的匹配关系, 进而找到所有的光斑与微透镜的匹配关系。该方法的优点在于光斑不需要被限制在子孔径内且在不增加硬件等其他辅助条件下能够有效地增大夏克-哈特曼波前传感器的动态范围。实验证明了光斑归位法的正确性和可行性, 结果表明, 光斑归位法是正确的且采用该方法的动态范围比传统算法的动态范围提高了 25 倍以上。

**关键词** 光学检测; 动态范围; 光斑归位法; 夏克-哈特曼波前传感器

中图分类号 O439 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201131.0812006

## Algorithm for Extending Dynamic Range of Shack-Hartmann Wavefront Sensor

Zhang Jinping<sup>1,2</sup> Zhang Zhongyu<sup>1</sup> Zhang Xuejun<sup>1</sup> Li Ruigang<sup>1</sup>

{<sup>1</sup> Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China}

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

**Abstract** A new algorithm called spots regression is presented to solve the tradeoff between the dynamic range and sensitivity of Shack-Hartmann wavefront sensor. This new algorithm allows spots to wander, so the dynamic range can be extended while the sensitivity is also sensitive. In order to find out the relation between the spots array and microlenses array even if spots leave their original sub-aperture, firstly, getting the irregular spots to their primary positions, secondly, finding out the match relation between one spot and one microlens. Finally, all spots and all microlenses match each other. The advantage of this algorithm is that there are no requirements for extra hardware, multiple measurements or complicated algorithms. A simple experiment is carried out to demonstrate its implementation. The results of this experiment are very closed to the theoretical ones. And the dynamic range is 25 times larger than that of conventional algorithm.

**Key words** optical test; dynamic range; spots regression; Shack-Hartmann wavefront sensor

**OCIS codes** 120.4630; 010.7350; 100.2960; 220.4840

## 1 引言

夏克-哈特曼波前传感器(SHWS)因结构简单、无移动部件、体积小、重量轻、实时性强和采集时间短等优点, 现已被广泛应用于自适应光学系统中的实时波前探测、激光光束质量诊断、大口径光学元件

面形检测和眼科医疗等领域<sup>[1~9]</sup>。

SHWS 的主要性能指标是灵敏度和动态范围。两者均与微透镜的 F 数相关, F 数越大, 灵敏度越高, 而动态范围越小。因此在设计 SHWS 微透镜时, 必须根据实际需求兼顾其灵敏度和动态范围。

收稿日期: 2011-03-14; 收到修改稿日期: 2011-04-19

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(61036015)资助课题。

作者简介: 张金平(1984—), 男, 博士研究生, 主要从事光学加工与检测等方面的研究。E-mail: blueapple7758@163.com

导师简介: 张学军(1968—), 男, 博士, 研究员, 主要从事先进光学制造技术方面的研究。E-mail: zxj@ciomp.ac.cn

因此,寻求一种在保持高灵敏度的同时还具有较大动态范围的新的计算方法是有实际意义的。J. Pfund 等<sup>[10]</sup>采用反卷积的方法建立了光斑与微透镜的对应关系,突破了传统哈特曼波前传感器的动态范围。Junwon Lee 等<sup>[11]</sup>按照坐标位置对光斑阵列和微透镜阵列分别进行排列,排列后的光斑与微透镜便建立了某种对应关系,从而增大了动态范围。其他几种方法如外推法、搜索法、泽尼克拟合法和螺旋线法等也都不同程度的增大了动态范围,但它们具有各自的限制和使用范围<sup>[12~14]</sup>。

本文提出了一种新的建立光斑与微透镜对应关系的数据处理算法——光斑归位法。该方法的优点是光斑不需要被限制在子孔径内,从而突破了传统 SHWS 的动态范围,实现了动态范围的增大。

## 2 SHWS 工作原理

SHWS 的工作原理是基于斜率测量的,如图 1 所示。入射光线经微透镜阵列分割并汇聚到像面处的 CCD 上,形成光斑阵列。当波前斜率较小时,每个光斑均位于各自子孔径内。通过像面分割及质心算法可计算出每个光斑的质心位置,并与参考位置作比较得出光斑偏离量,再利用波前重构算法便可复原被检测波前<sup>[15,16]</sup>。

子孔径范围内波前平均斜率与光斑偏离量( $\Delta x, \Delta y$ )的关系可表示为

$$\begin{cases} \frac{f}{S} \oint \frac{\partial W(x, y)}{\partial x} = \Delta x \\ \frac{f}{S} \oint \frac{\partial W(x, y)}{\partial y} = \Delta y \end{cases}, \quad (1)$$

式中  $f$  为微透镜焦距,  $S$  为子孔径面积,  $W$  为入射波前。传统 SHWS 要求光斑必须位于子孔径范围内才能进行有效的质心计算,即满足

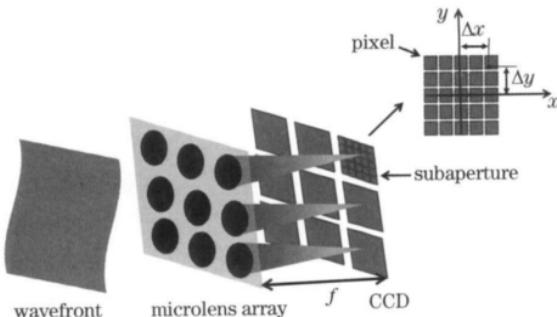


图 1 夏克-哈特曼波前传感器原理示意图

Fig. 1 Principle map of Shack-Hartmann wavefront sensor

$$(\Delta x)_{\max} < \frac{D}{2}, \quad (\Delta y)_{\max} < \frac{D}{2}, \quad (2)$$

式中  $D$  为子孔径口径。此条件大大限制了 SHWS 的动态范围。在不改变硬件结构的前提下想要增大动态范围,只有允许光斑可以偏离子孔径范围。此时传统的光斑处理方法已经无法使用,必须寻求新的光斑搜索方法及新的光斑——微透镜匹配方法。而光斑归位法正是一种可以处理光斑偏离子孔径范围的新方法。

## 3 光斑归位法

### 3.1 光斑自动搜索算法

当光斑偏离子孔径范围时,如图 2 所示,传统的图像分割方法已经不能找到光斑质心的有效计算区域。为了正确地找到偏离子孔径的光斑,本文提出了一种能够快速正确地找到光斑的新方法——光斑自动搜索算法。

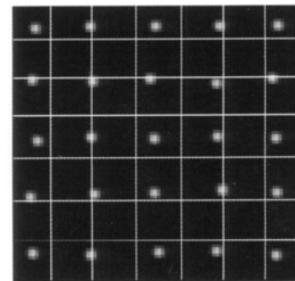


图 2 传统夏克-哈特曼波前传感器图像分割

Fig. 2 Picture segmentation of conventional Shack-Hartmann wavefront sensor

首先根据光斑光强选取合适的阈值,使得除光斑中心几个像素光强非零外,其他像素光强值全为零。微透镜口径较小时,会有衍射效应,光斑会出现二次极大值,因此选择的阈值应当高于光斑次极大值。同时要避免光斑中心存在几个像素的光强值相等的情况,需要在整个光斑强度图像上叠加  $x, y$  方向不同斜率的光强倾斜面,使得每个光斑只有一个像素光强值为最大。

其次判断每个像素光强值是否为局部最大,并记录局部光强最大值的像素所在位置索引。每个具有局部光强最大值的像素都代表了一个光斑,此像素所在位置近似代表光斑质心位置。

最后根据每个局部光强最大值像素所在位置选取合适的质心探测窗口便可对光斑进行质心运算,同时将除局部最大像素光强值外所有的像素光强值赋为零,使得每个光斑有且只有一个像素光强值不

为零。求取的光斑质心被保存在具有局部最大值的像素中。最终每个具有局部最大光强值的像素都有两组数据,一组数据是该像素所在光斑的质心,另一组数据是近似代表光斑位置的像素索引。图 3 为采用光斑自动搜索算法得到的光斑位置。

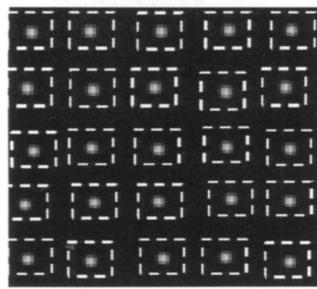


图 3 光斑自动搜索算法图像分割

Fig. 3 Picture segmentation of spot-auto-search algorithm

### 3.2 光斑归位法

光斑归位法的目的是使排列无序的光斑重新排列整齐,即由波前斜率引起的偏离光斑重新回到其原来的位置,形成规则的光斑阵列。图 4,5 显示了光斑归位法的工作过程。

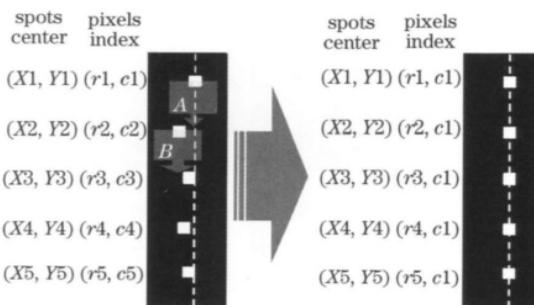


图 4 光斑列归位

Fig. 4 Column regression of spots

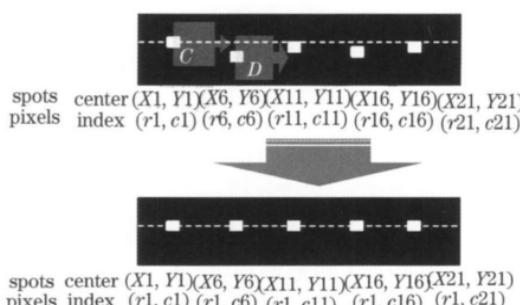


图 5 光斑行归位

Fig. 5 Row regression of spots

第一步是对所有非零光强像素进行列归位。找到代表光斑的无序像素中的一个非零光强像素,如

图 4 中的( $r_1, c_1$ )像素,以所有光斑之间的平均像素距

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

离为宽度(奇数),以代表光斑位置的像素索引值  $c_1$  为中心对光斑进行向上向下搜索。若在搜索区域内碰到非零光强像素,即表示在此处有一个光斑,如图 4 中的搜索区域 A 首先碰到像素( $r_2, c_2$ ),则该像素的索引  $c_2$  被赋予新的索引值  $c_1$ 。找到像素( $r_2, c_2$ )后,搜索区域的中心线改为  $c_2$ ,如图 4 中的 B 区域,继续对光斑进行搜索,直至找到与像素( $r_1, c_1$ )同列的所有像素。完成一列像素列归位后,继续进行下一列的归位,直到所有像素在列方向上全部归位。

第二步是在像素全部列归位的基础上再对所有非零光强像素进行行归位,方法同列归位相同,如图 5 所示。

对非零光强像素进行列归位和行归位后,代表光斑位置的非零光强像素就排列成规则的阵列,然后再提取像素矩阵中非零光强像素的行和列,形成有效数据矩阵,此时所有的光斑便排成规则的光斑阵列。

最后一步是确定光斑与微透镜的对应关系。因为光斑已经排列成规则的阵列,所以在此只需找到其中一个光斑所对应的微透镜,则所有的光斑都能找到与其一一对应的微透镜了。

### 3.3 光斑归位法的优缺点

从上面的分析可知,光斑归位法的优点在于可以允许光斑偏离子孔径范围,这意味着在不改变硬件及无其他辅助条件下提高了 SHWS 的动态范围。因该方法是基于整行整列进行光斑排序的,因此在某几个光斑缺失的情况下该方法同样有效,增大了 SHWS 的应用范围。

同时由于理论的局限,该方法也有其限制条件和适用范围:

1) 光斑阵列具有一定的连续性,即光斑不能孤立于其他光斑;

2) SHWS 测量的是子孔径范围内波前的平均斜率,又加之采样点有限( $128 \text{ pixel} \times 128 \text{ pixel}$ ),因此 SHWS 的固有缺陷是平滑高频误差。而中低频误差的出现会增加光斑阵列的无序性,在一定条件下该方法可以使无序光斑阵列排列成规则阵列。此一定条件为子孔径内波前平均斜率的变化率需满足相邻光斑的偏移量小于光斑平均距离的一半,即

$$\begin{cases} \frac{1}{S} \oint \frac{\partial^2 W(x, y)}{\partial x^2} < \frac{D}{2f}, \\ \frac{1}{S} \oint \frac{\partial^2 W(x, y)}{\partial y^2} < \frac{D}{2f}, \end{cases} \quad (3)$$

在自适应光学中受大气湍流影响的波前以及光学元

件粗抛光中的波前均为中低频误差,且相邻子孔径波前平均斜率变化率均比较小,因此可以采用此方法进行数据处理。

## 4 实验验证

光斑归位法的可行性和正确性可以通过实验来验证。为了简化实验,直接用 SHWS 检测点光源发出的球面波。实验中的 SHWS 规格为:微透镜阵列  $128 \times 128$ , 微透镜口径  $0.114\text{ mm}$ , 焦距  $4.1\text{ mm}$ , CCD 像素  $2048\text{ pixel} \times 2048\text{ pixel}$ , 实验装置如图 6 所示。

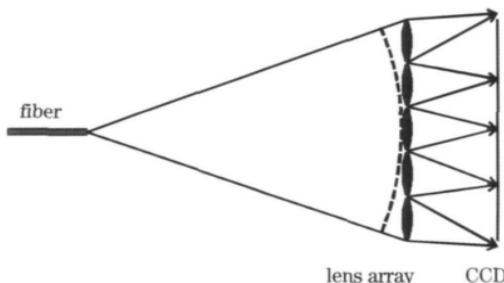


图 6 实验装置示意图

Fig. 6 Schematic of setup

实验分为两步:1)系统误差标定。用标准平面波对 SHWS 进行标定,标定结果作为相对检测时的参考波面;2)以激光光纤作为点光源,用 SHWS 对其产生的球面波前进行检测。通过控制点光源到 SHWS 的距离,可以得到不同斜率的波前。在此分别选择  $1000, 525, 50$  和  $20\text{ mm}$  进行实验。

根据(2),(3)式可以计算出传统 SHWS 所能检测的最大波前斜率为  $13.9\text{ mrad}$ ,若检测球面波前,点光源距 SHWS 的最小距离为  $525\text{ mm}$ 。距离再减小,则会因为边缘光斑偏离出子孔径范围而不能计算光斑质心,无法进行波前检测,图 7 为点光源距 SHWS 为  $200\text{ mm}$  时的光线追迹结果。此时,传统 SHWS 已经无法进行检测。

而采用光斑归位法却无此限制,实验过程同时进行了去掉系统误差的相对测量和不去系统误差的绝对测量,采用光斑归位法后的几组实验结果如表 1 所示。

表 1 实验结果( $\lambda=633\text{nm}$ )

Table 1 Results of experiment ( $\lambda=633\text{ nm}$ )

Distance /mm	Theory	Relative(RMS)	Absolute(RMS)
1000	$17.77\lambda$	$17.75\lambda$	$17.61\lambda$
525	$33.84\lambda$	$33.80\lambda$	$33.76\lambda$
50	$358.26\lambda$	$358.16\lambda$	$358.17\lambda$
20	$938.49\lambda$	$938.34\lambda$	$938.34\lambda$

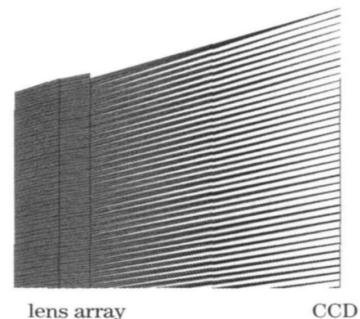


图 7 光线追迹结果(点光源距 SHWS 为  $200\text{ mm}$ )

Fig. 7 Result of ray trace (distance between point source and SHWS is  $200\text{ mm}$ )

从表 1 可以看出,不同距离下点光源产生的球面波均可采用光斑归位法对其进行检测,其检测结果与理论值偏差小于  $0.15\lambda$ 。点光源经过事先检验,认为是理想点光源,这就证明了该算法是正确可行的。对比第 2 组数据和第 4 组数据,可以得出新的算法比传统算法在动态范围上增大至少 25 倍以上。

同时还看到,随着点光源到 SHWS 的距离变小,检测结果与理论偏差出现增大趋势,这是由于随着距离的变小,CCD 上的光斑同时在变大、变形,质心计算不准确,造成波前复原存在误差。

在进行波前检测时,SHWS 采用的是相对检测,即检测结果是去除系统误差后的结果。系统误差主要由微透镜的制造误差及组装误差组成,其值较小。在一些特殊地方,如在大口径反射镜研磨阶段面形检测中,因系统误差与面形误差相比可以忽略,可以不考虑系统误差而直接对波前进行检测,即采用绝对检测,此时可认为传感器是完美的。这种检测方法的优点是不需要光斑阵列与微透镜阵列进行匹配,在已知微透镜的间距的前提下,只需利用光斑归位法得到规则的光斑阵列便可进行波前复原。

## 5 结 论

光斑归位法是一种能够有效增大 SHWS 动态范围的新的数学处理方法。该方法的核心是使排列不规则的光斑回到各自原来的位置,重新排列成规则的光斑阵列,再找到其中某个光斑与微透镜的对应关系,从而使所有的光斑都找到与其一一对应的微透镜。其优点是光斑不再局限于小小的子孔径,且在某几个光斑缺失的情况下,该方法同样有效。通过实验分析,该方法能够显著增大 SHWS 的动态范围,并能完好地复原波前,从而扩大了 SHWS 的应用范围。

## 参 考 文 献

- 1 Hou Jing, Jiang Wenhan, Ling Ning. The misalignment error of Hartmann-Shack wavefront sensors and deformable mirror in the two kinds of adaptive optics systems[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(6): 751~755
- 侯 静, 姜文汉, 凌 宁. 两种自适应光学系统中哈特曼波前传感器与变形镜的对准误差[J]. 光学学报, 2003, **23**(6): 751~755
- 2 Xian Hao, Li Huagui, Jiang Wenhan et al.. Measurement of the wavefront phase of a laser beam with Hartmann-Shack sensor[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1995, **22**(2): 38~45
- 鲜 浩, 李华贵, 姜文汉 等. 用 Hartmann-Shack 传感器测量激光束的波前相位[J]. 光电工程, 1995, **22**(2): 38~45
- 3 M. H. Daniel, M. V. Duran-Ramirez. Measuring aspheric wavefronts with high accuracy using Hartmann test[C]. *SPIE*, 2005, **5776**: 524~529
- 4 Rao Xuejun, Ling Ning, Wang Cheng et al.. Application of Hartmann-Shack sensor in aspheric process [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(4): 491~494
- 饶学军, 凌 宁, 王 成 等. 哈特曼-夏克波前传感器在非球面加工中的应用[J]. 光学学报, 2002, **22**(4): 491~494
- 5 Tang Guomao, He Yumei, Liao Zhou. Radial Hartmann method for measuring large optical system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 795~799
- 汤国茂, 何玉梅, 廖 周. 大型光学系统径向哈特曼像质检测方法[J]. 中国激光, 2010, **37**(3): 795~799
- 6 Zheng Hanqing, Rao Changhui, Rao Xuejun et al.. Wavefront stitching detection method based on Hartmann-Shack wavefront sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(12): 3385~3390
- 郑翰清, 饶长辉, 饶学军 等. 基于哈特曼-夏克波前传感器的波前拼接检验方法[J]. 光学学报, 2009, **29**(12): 3385~3390
- 7 Bao Hua, Rao Changhui, ZhangYudong et al.. An automatic defocus compensation method for human eye hartmann-Shark wavefront aberrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(11): 3082~3089
- 鲍 华, 饶长军, 张雨东 等. 一种可用于人眼像差哈特曼-夏克测量仪的自动离焦补偿方法[J]. 光学学报, 2010, **30**(11): 3082~3089
- 8 Li Chao, Jiang Baoguang, Xia Mingliang et al.. Laser speckle reduction in retina imaging illumination[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(12): 2245~2249
- 李 抄, 姜宝光, 夏明亮 等. 用于人眼视网膜成像照明的激光消散斑技术研究[J]. 光学学报, 2008, **28**(12): 2245~2249
- 9 Quan Wei, Ling Ning, Wang Zhaoqi et al.. Property study for Hartmann sensor used in measuring wave aberration of human eye [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2003, **30**(3): 1~5
- 全 薇, 凌 宁, 王肇圻 等. 哈特曼传感器测量人眼波前像差的特性研究[J]. 光电工程, 2003, **30**(3): 1~5
- 10 J. Pfund, N. Lindlein, J. Schwider. Dynamic range expansion of a Shack-Hartmann sensor by use of a modified unwrapping algorithm[J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(13): 995~997
- 11 L. Junwon, V. Roland, Shack et al.. Sorting method to extend the dynamic range of the Shack-Hartmann wavefront sensor[J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(23): 4835~4845
- 12 Li Huaqiang, Song Helun, Rao Changhui et al.. Extrapolation method to extend dynamic range of Shack-Hartmann wave-front sensor[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(7): 1203~1207
- 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
- 13 K. Ji-Yeon, K. Min-Seok, U. Tae-kyung et al.. A study on the dynamic range expansion of the Shack-Hartmann wavefront sensor using image processing[C]. *SPIE*, 2007, **6691**: 1~9
- 14 D. G. Smith, J. E. Greivenkamp. Generalized method for sorting Shack-Hartmann spot patterns using local similarity [J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(25): 4548~4554
- 15 Shen Feng, Jiang Wenhan. The measurement error of wavefront phase with Shack-Hartmann wavefront sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(5): 666~671
- 沈 锋, 姜文汉. 夏克-哈特曼波前传感器的波前相位探测误差[J]. 光学学报, 2000, **20**(5): 666~671
- 16 Wu Yi, Wang Yingjian. Simulation and error analysis for Hartmann wavefront sensing and deformable mirror wavefront recovery[J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15**(4): 473~479
- 吴 毅, 王英健. 哈特曼波前探测及波前校正的仿真与误差分析[J]. 光学学报, 1995, **15**(4): 473~479