

提高哈特曼波前传感器质心探测精度的一种计算方法

周文超 彭勇 游安清

(中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要 分析了哈特曼(Hartmann)波前传感器传统阈值一阶矩质心算法的局限性,提出了一种改进算法,对质心探测窗口的大小先进行合理优化,再采用灰度积分图原理进行自动搜索,最后采用灰度平方加权质心算法进行质心计算。仿真分析验证了算法的可行性和优越性,有利于提高波前传感器质心探测精度。

关键词 传感器;波前传感器;质心探测;积分图原理;灰度加权质心算法

中图分类号 TN248 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.061203

An Improved Centroid Detecting Calculation Method of Hartmann Wavefront Sensor

Zhou Wenchao Peng Yong You Anqing

(Applied Electronics Institute, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract The limitation of traditional threshold moment centroid algorithm for Hartmann wavefront sensor is analyzed. An improved algorithm is proposed, which the centroid detection window size is optimized and searched automatic with the gray integral principle, finally uses the intensity weighted centroiding algorithm to calculate. Simulation and analysis prove the feasibility, which is beneficial to improve the wavefront sensor centroid detecting accuracy.

Key words sensors; wavefront sensor; centroid detection; grey-image integral principle; intensity weighted centroiding

OCIS codes 120.5050; 040.1240; 110.1080

1 引言

哈特曼-夏克(Hartmann-Shack)波前传感器主要由微透镜阵列和 CCD 组成^[1],具有光能利用率高、测量环境要求低、使用方便和可同时测量光场的波前相位分布和强度分布的时间特性与空间特性^[2]等优点,广泛应用于自适应光学系统、激光光束质量诊断和光学元件的检测领域^[3]。通常采用精度高、量子效率高和可靠性高的 CCD 相机作为探测器件^[4],来探测光斑阵列各子孔径的质心位置。波像差的探测精度依赖于子孔径光斑的质心探测和计算精度^[5]。一般采用子孔径光斑强度的一阶矩来计算质心位置,并通过合理设置计算阈值减小 CCD 噪声的影响^[6],提高波前传感器质心探测精度。但当背景噪声起伏较大时阈值一阶矩法具有局限性,同时质心探测窗口的大小对质心探测精度也有较大影响。本文提出一种改进算法,对质心探测窗口大小进行合理优化,基于积分图原理自动搜索光斑质心探测窗口,最后优化光斑质心计算方法,以提高 Hartmann 波前传感器质心探测精度。

2 常用阈值一阶矩质心算法

阈值一阶矩质心算法是指先对图像进行阈值分割,再进行一阶矩质心计算,较普通一阶矩质心算法探测精度可得到明显的提高。算法的关键在于阈值的选取,常用的阈值选取方法有固定值阈值、经验阈值和自适

收稿日期: 2011-12-18; 收到修改稿日期: 2012-03-06; 网络出版日期: 2012-04-24

作者简介: 周文超(1978—),男,副研究员,主要从事激光参数测试技术方面的研究。E-mail: zwc0710@hotmail.com

应阈值等。阈值一阶矩质心算法可表示为

$$\begin{cases} X_i = \frac{\sum_{(x,y) \in A_i} I(x,y)x}{\sum_{(x,y) \in A_i} I(x,y)} \\ Y_i = \frac{\sum_{(x,y) \in A_i} I(x,y)y}{\sum_{(x,y) \in A_i} I(x,y)} \end{cases}, \quad (1)$$

式中 $I(x,y) = \begin{cases} 0, & P(x,y) < T(x,y) \\ P(x,y) - T(x,y), & P(x,y) \geq T(x,y) \end{cases}$; (X_i, Y_i) 是第 i 个子孔径的质心计算坐标; $P(x,y)$ 和 $T(x,y)$ 分别是子孔径内 (x,y) 点对应的光斑强度和阈值; A_i 表示第 i 个子孔径窗口区域。

由于 CCD 探测器件存在读出噪声、光子起伏噪声以及目标背景噪声等因素,从而引起 Hartmann 传感器质心探测误差。研究表明由光子起伏噪声和读出噪声等随机噪声引起的质心探测误差可表示为^[7]

$$\sigma_{\text{scr}}^2 = \frac{\sigma_A^2}{V} + \frac{\sigma_r^2}{V^2} + ML \left(\frac{L^2 - 1}{12} + X_c^2 \right) p^2, \quad (2)$$

式中 σ_{scr} 为 x 方向质心探测方差; σ_A 为光斑等效高斯宽度; σ_r 为 CCD 读出噪声方差; V 为探测到的总光子数, X_c 为 x 方向质心坐标; M 和 L 为探测窗口内像素数; p 为子孔径像素数。 y 方向质心误差分析与 x 方向相同。可见,波前传感器质心探测误差与入射到子孔径上光电子数、子孔径像素数、每个像素的噪声以及子孔径对应衍射光斑大小的像素数等因素有关。

在背景噪声比较均匀的情况下,采用阈值一阶矩质心算法可减小 CCD 噪声的影响,有研究表明,阈值采用每个像素的背景噪声电子数加上 3 倍的噪声起伏电子数的经验值是合适的。但均匀噪声也存在一定的起伏,阈值法并不能将这部分噪声全部消除,甚至在随机噪声起伏较大时,提高阈值非但不能提高质心探测精度,反而可能会降低质心探测精度^[6]。

从(2)式可看出,质心探测窗口的大小也是影响质心探测误差的因素之一。当质心探测窗口增大,尤其相对光斑较大时,根据(1)式和(2)式,子孔径窗口内远离光斑的那些像素的噪声对一阶矩计算结果有很大的影响,会使质心探测产生很大的误差。阈值一阶矩质心算法采用子孔径窗口作为质心探测窗口,当光斑尺寸相对较小时可能会带来较大的质心探测误差。

可见,在光斑强度信噪比较低、CCD 存在散弹噪声或子孔径窗口相对光斑尺寸较大的条件下,阈值一阶矩质心算法存在着局限性。要提高 Hartmann 传感器质心探测精度,可在阈值处理的基础上,选择合适的质心探测窗口使之与子孔径内光斑相匹配,同时对一阶矩算法进行优化,减小远离光斑像素噪声的影响。

3 改进的质心探测窗口优化与搜索算法、灰度平方加权质心算法

3.1 质心探测窗口大小的优化

Hartmann 传感器中,子孔径窗口相对光斑尺寸较大,当传感器探测动态范围较大时尤其明显,采用子孔径窗口作为质心探测窗口增大了远离光斑像素噪声的影响,从而导致较大的计算误差。质心探测窗口也不能过小,过小则光斑信息可能被截断,也会引起较大的探测误差。因此,必须对质心探测窗口的大小进行合理优化和设置。

Hartmann 传感器中,被测波面被微透镜阵列分割成许多子孔径。由于单个子孔径探测的是局部细小区域的波面,一般情况下,子孔径内光斑分布接近衍射极限。因此,可将菲涅耳衍射一级衍射斑大小视为子孔径聚焦光斑的大小。

实际质心探测窗口 W 的大小可比一级衍射光斑大小略大 2~3 pixel。

3.2 积分图原理光斑搜索算法

点阵光斑搜索的方法很多,通常有模板匹配法、多目标连通域检查法等,这些方法往往计算量较大,并且易受阈值等边界条件影响。这里基于光斑强度积分图原理提出一种光斑搜索方法,可自动获取子孔径质心探测窗口。

具体原理如图 1 所示,遍历图像并记 $S(x,y)$ 为点 $(0,0)$ 到点 (x,y) 的矩形内像素强度之和,那么以 (x_0, y_0) 为顶点,长宽为 (a,b) 的矩形内像素强度和可记为

$$I(x_0, y_0, x_0 + a, y_0 + b) = S(x_0 + a, y_0 + b) + S(x_0, y_0) - S(x_0 + a, y_0) - S(x_0, y_0 + b), \quad (3)$$

显然, $S(x,y)$ 与相邻坐标点满足

$$S(x,y) = S(x-1,y) + S(x,y-1) - S(x-1,y-1). \quad (4)$$

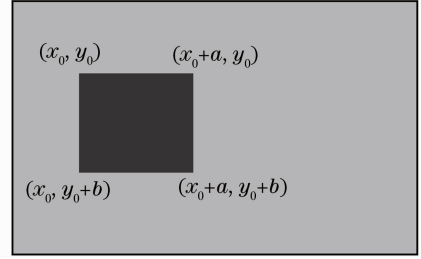


图 1 光束强度积分图示意图

Fig. 1 Schematic of beam integral intensity

将点阵图像进行阈值处理后,并将负值置零^[8],采用

积分图原理搜索窗口大小为 W 的区域内的强度最大值,作为某一点阵光斑,搜索的该区域作为对应光斑的质心探测窗口,然后从原图像中将该光斑区域强度赋值为零,重新进行下一次搜索,直至搜索与子孔径数目相等的光斑,然后按照坐标位置关系进行排序,最后在质心探测窗口内计算光斑质心。

这种搜索算法能够准确找到光斑点阵位置,并且可以扩展 Hartmann 波前传感器测试动态范围。但按照上述搜索方法计算量太大,为简化计算过程,提高数据处理的快速性,在预设的每个子孔径窗口内进行积分图光斑搜索,只需遍历一次图像就可完成全部光斑的搜索,无需自动排序处理。

3.3 灰度平方加权质心算法

光斑质心算法主要有普通一阶矩质心算法、加权质心算法、阈值质心算法和距离质心算法等几种方法^[9]。灰度平方加权质心算法可表示为

$$\begin{cases} X_i = \frac{\sum_{(x,y) \in A_i} I^2(x,y)x}{\sum_{(x,y) \in A_i} I^2(x,y)} \\ Y_i = \frac{\sum_{(x,y) \in A_i} I^2(x,y)y}{\sum_{(x,y) \in A_i} I^2(x,y)} \end{cases}. \quad (5)$$

灰度平方加权质心算法使得目标灰度分布的权重得以进一步地突出,提高了光斑中心强度值较大点的影响力,从而提高质心探测精度,即使光斑形态不近似高斯分布,该方法依然能够准确地探测光斑质心。

4 仿真分析

首先产生一幅近衍射极限光斑图像,光斑直径为 35 pixel,设置图像窗口为 140 pixel×140 pixel,光斑区

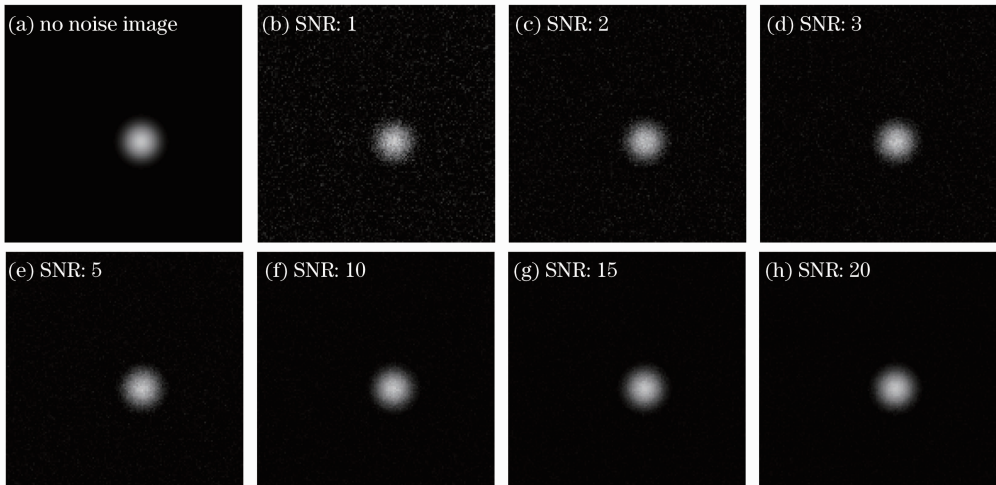


图 2 不同信噪比光斑图像

Fig. 2 Beam spot image with different SNR

域外图像灰度均为 0,如图 2(a)所示,此时记一阶矩质心位置为光斑理论质心位置。

在光斑图像上加载不同信噪比(SNR)的高斯噪声,如图 2(b)~(h)所示。阈值质心算法在图像全窗口内计算,阈值选取为加载噪声的 3 倍起伏值;改进型的算法基于理论光斑大小对质心探测窗口进行优化,选取质心窗口为 $38 \text{ pixel} \times 38 \text{ pixel}$,在图像上采用积分图原理搜索出光斑区域,采用灰度平方加权质心算法计算光斑质心,比较两种计算方法的质心计算误差。

两种计算方法的计算结果如图 3 所示。可以看出,在信噪比较低的条件下,基于光斑大小优化窗口再进行质心计算的改进型算法质心精度具有明显的优势,随着光斑图像信噪比的不断提高,两种算法的误差越来越趋于接近,表明了提出的改进型质心算法在低信噪比条件下具有一定的应用意义。

图 4 为实际 Hartman 波前传感器光斑点阵,图 4(a)为子孔径区域对应窗口以及在窗口内采用阈值一阶矩计算的质心点标记,图 4(b)为采用积分图原理搜索得到的优化窗口以及采用改进型算法计算得到的质心点标记。相比较而言,自动搜索优化大小后的窗口再进行质心计算,计算的质心位置能靠近光斑中心区,表明了质心探测精度更高。

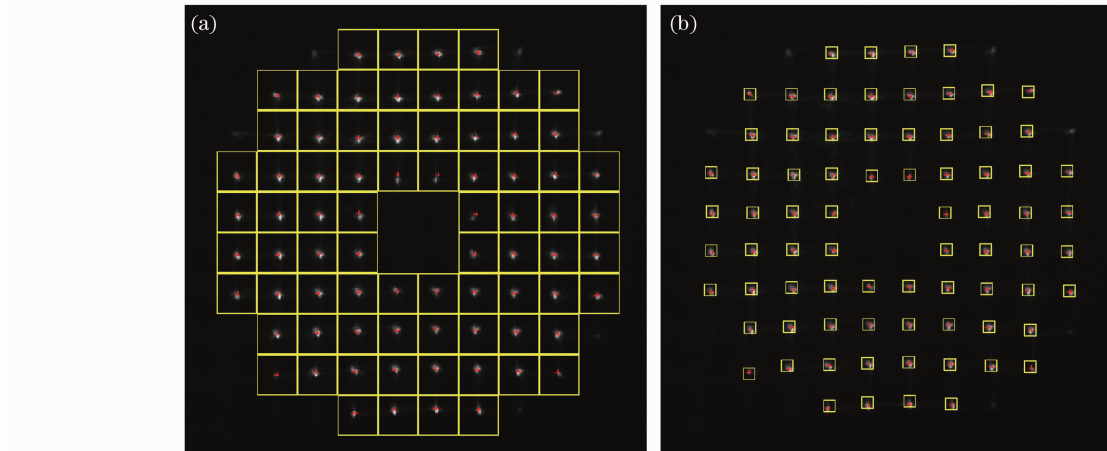


图 4 Hartman 子孔径窗口(a)及积分图原理搜索得到的优化探测窗口(b)

Fig. 4 Hartman subaperture windows (a) optimizing detecting window with integral principle (b)

5 结 论

在 Hartmann 波前传感器应用中,当光斑强度信噪比较低、CCD 存在散弹噪声或子孔径窗口相对光斑尺寸较大的条件下,常用的阈值一阶矩质心算法存在着局限性。本文提出了一种改进算法,对质心探测窗口进行合理优化,并基于强度积分图法原理进行光斑搜索,最后采用灰度平方加权算法在质心探测窗口内计算光斑质心。相比较传统阈值一阶矩算法,波前传感器的质心精度得到了提高,并且有利于测量动态范围的扩展,仿真分析验证了算法的可行性和优越性。

参 考 文 献

1 Ma Xiaoyu, Zheng Hanqing, Rao Changhui. Optimal spot centroid position during Shack-Hartmann wavefront sensor calibration in adaptive optics system[J]. *Opto-Electron. Engng.*, 2009, **36**(4): 22~26

马晓燮, 郑翰清, 饶长辉. 自适应系统中哈特曼波前传感器光斑质心的最佳标定位置[J]. *光电工程*, 2009, **36**(4): 22~26

- 2 Duan Haifeng, Yang Zeping, Wang Shuqing *et al.*. Model wavefront reconstruction of Shack-Hartmann sensor on arbitrary expression by Zernike polynomial[J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(6): 517~520
段海峰, 杨泽平, 王淑青 等. 夏克-哈特曼传感器任意形状孔径波前的模式重构及 Zernike 多项式描述[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(6): 517~520
- 3 Li Huagui, Jiang Wenhan. Application of H-S wavefront sensor for quality diagnosis of optical system and light beam[C]. *ICO-16 Satellite Conference on Active and Adaptive Optics*, 1993. 369~376
- 4 Seifert L., Liesener J., Tiziani H. J.. The adaptive Shack-Hartmann sensor[J]. *Opt. Commun.*, 2003, **216**(4): 313~319
- 5 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
- 6 Shen Feng, Jiang Wenhan. A method for improving the centroid sensing accuracy threshold of Hartmann wavefront sensor [J]. *Opto-Electron. Engng.*, 1997, **24**(3): 1~8
沈 锋, 姜文汉. 提高 Hartmann 波前传感器质心探测精度的阈值方法[J]. *光电工程*, 1997, **24**(3): 1~8
- 7 Cao G. R., Yu X.. Accuracy analysis of a Hartmann-Shack wavefront sensor operated with a faint object[J]. *Opt. Engng.*, 1994, **33**(7): 2331~2335
- 8 Jiang Wenhan, Xian Hao, Shen Feng. Detecting error of Shack-Hartmann wavefront sensor[J]. *Chinese J. Quant. Electron.*, 1998, **15**(2): 218~227
姜文汉, 鲜 浩, 沈 锋. 夏克-哈特曼波前传感器的探测误差[J]. *量子电子学报*, 1998, **15**(2): 218~227
- 9 Jing Wenbo, Duan Jin, Wang Xiaoman *et al.*. Comparison of Shack-Hartmann array spot centroid detection errors[J]. *J. Jilin University*, 2010, **48**(6): 1013~1017
景文博, 段 锦, 王晓曼. 夏克-哈特曼阵列光斑质心探测误差比较[J]. *吉林大学学报*, 2010, **48**(6): 1013~1017