

夏克-哈特曼波前探测器的距离-幂指数 加权质心探测算法

葛睿¹, 申文¹, 刘超², 苏宙平¹, 朱华新¹, 李大禹², 鲁兴海², 穆全全², 曹召良², 宣丽², 胡立发¹

¹江南大学理学院江苏省轻工光电工程技术研究中心, 江苏 无锡 214122;

²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 对于暗弱目标探测, 现有的方法仍然存在探测误差较大的问题, 为了提高夏克-哈特曼波前探测器的质心探测精度, 提出了一种改进的距离-幂指数质心探测算法。在不同情况下将所提算法与现有的几种质心算法进行对比, 仿真结果表明, 在不同信噪比、不同光斑直径、子区域不同像素等因素影响下, 所提算法的质心探测误差低于其他算法的误差, 且更为稳定。

关键词 探测器; 信息处理; 夏克-哈特曼波前探测器; 质心探测算法

中图分类号 TP391; TP212.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.040401

Distance-Power Index Weighted Centroid Detection Algorithm for Shack-Hartmann Wavefront Sensors

Ge Rui¹, Shen Wen¹, Liu Chao², Su Zhouping¹, Zhu Huaxin¹, Li Dayu², Lu Xinghai²,
Mu Quanquan², Cao Zhaoliang², Xuan Li², Hu Lifa¹

¹Jiangsu Provincial Research Center of Light Industrial Optoelectronic Engineering and Technology,
School of Science, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China;

²State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

Abstract For the weak target detection, the existing methods still have the problem of large detection error. In order to improve the accuracy of the centroid detection of the Shack-Hartmann wavefront sensor, an improved distance-power index centroid detection algorithm is proposed. The proposed algorithm is compared with several existing centroid algorithms under different conditions, the simulation results show that the centroid detection error of proposed algorithm is lower and more stable than that of other algorithms under the factors of different signal-to-noise ratios, different spot diameters and different pixels in sub-area.

Key words detectors; information processing; Shack-Hartmann wavefront sensor; centroid detection algorithm

OCIS codes 040.5160; 040.1880; 010.1080; 100.3008

1 引言

夏克-哈特曼波前探测器具有结构简单、测量精度高、动态范围大、实时性好等优点, 在自适应光学、光学元件面形测量、光束质量评价等领域得到了广

泛的应用^[1-5]。在天文观测领域, 天体目标一般比较暗, 信噪比(SNR)比较低, 因此, 在利用自适应光学系统进行探测、补偿和成像时, 高精度的质心探测成了关键的第一步, 质心探测的准确度直接影响了波前重构的精度和最终成像质量。因此, 人们对质心

收稿日期: 2017-09-06; **收到修改稿日期:** 2017-10-18

基金项目: 国家自然科学基金(61475152, 61405194, 61378075)

作者简介: 葛睿(1996—), 女, 硕士研究生, 主要从事自适应光学方面的研究。E-mail: gerui1222@163.com

导师简介: 胡丽发(1974—), 男, 博士, 研究员, 主要从事自适应光学、液晶光学方面的研究。

E-mail: lightimage@163.com(通信联系人)

计算方法高度重视,并进行了大量研究。

按探测目标不同,夏克-哈特曼探测器的质心探测算法主要分为两类,一类是针对面目标的质心算法,例如针对太阳观测的自适应光学系统一般采用相关算法来进行质心探测^[6],国内中国科学院光电技术研究所、国家天文台南京天文光学技术研究所和国家天文台等单位对其进行了大量研究,取得了很好的成果;另一类是针对点目标的质心算法,例如恒星、卫星、空间碎片等。对点目标的探测,国内外研究者进行了长期研究,提出了大量的算法^[7-11]。首先,基本质心算法简单快速,但无法抑制各种噪声的影响;阈值质心法以某一阈值为分界^[7],高于阈值的被认为是信号,低于阈值的被认为是噪声,该方法可过滤部分噪声,但阈值的准确确定比较困难,阈值过高会导致信号缺失。1979年日本学者大津提出了大津法,即自适应阈值(ATCG)法^[8],该方法使用最大类间差提取阈值,虽然解决了确定阈值的难题,但计算过程复杂,耗时大,不适合应用于校正大气湍流的自适应光学系统之中;2010年,Bradley等^[9]提出高斯加权(GCG)法,该方法利用高斯函数对光斑信号加权,可对信号进行加强,抑制周围噪声的影响,但对光斑形态要求较高,而且在夏克-哈特曼探测器的子区域像素数比较少的情况下,若光点占的像素少,容易引起较大的误差,另外该方法还需要对光斑进行高斯拟合匹配,计算时间长;2004年,Nicolle等^[10]提出幂指数加权(PCG)法,即对每个像素的光强加幂指数进行处理,该方法中幂指数的选择对计算精度影响较大;2015年,Wang等^[11]提出局部均值加权算法抑制光子噪声的影响,可以有效地应对空间目标成像下夏克-哈特曼探测器的高精度质心探测。在天文观测、眼底成像、光学元件加工过程中的面形检测等应用中,都要求自适应光学系统能应对暗弱目标,并进行快速的探测和校正,因此,需要进一步研究暗弱目标的探测,提高质心探测精度。

为了能够尽可能完美地补偿大气湍流所造成的波前畸变,需要尽可能减少波前探测器质心算法所造成的误差。本文针对暗弱目标的探测,提出一种距离-幂指数加权(DPCG)的质心算法,通过仿真模拟了不同信噪比、不同光点尺寸、不同倾角等因素的影响,结果表明所提出的质心探测算法有效地提高了夏克-哈特曼波前探测器的探测精度。

2 基本原理

基本质心法的质心横纵坐标的计算公式分别

为^[11-12]:

$$\hat{x}_c = \frac{\sum x I_{x,y}}{\sum I_{x,y}}, \hat{y}_c = \frac{\sum y I_{x,y}}{\sum I_{x,y}}, \quad (1)$$

式中 $I_{x,y}$ 为 x 行 y 列处像素的光强, x 和 y 分别为该像素的坐标。当夏克-哈特曼探测器中子区域像素比较少、同时观测的目标比较弱时,按(1)式计算得到的质心误差比较大。为了减少低信噪比下质心探测的误差,对其进行改进。在利用大口径光学望远镜观测天文目标时,考虑到波前校正的实时性,一方面,自适应光学系统中夏克-哈特曼波前探测器的子区域像素数一般比较少;另一方面,按照夏克-哈特曼探测器的常规设计,子区域所对应的口径与大气湍流相干长度一致,子区域内的光点近似认为只受倾斜的影响,只有移动而没有畸变,因此可以用圆来拟合光斑的粗略中心位置,计算加权分布函数,然后利用常规的质心算法计算加权后的光点质心。

2.1 光斑的圆拟合过程

首先,对经过电荷耦合器件(CCD)离散采样后的光点图像进行边缘检测,提取到光斑的边界样本点。使用 \log 算子对图像进行边缘检测,然后对得到的边界样本点使用最小二乘法拟合圆^[13],得到的圆心即为光斑中心 (x_0, y_0) 。 \log 算子来源于 Marr 视觉理论中提出的边缘提取思想,原理是先使用二维高斯函数对图像进行平滑处理,再使用拉普拉斯算子来检测图像边缘^[14]。

二维高斯函数 $G(x, y)$ 的表达式为:

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right), \quad (2)$$

式中 σ 是正态分布的标准偏差。

用 $G(x, y)$ 对原始图像 $f(x, y)$ 进行卷积,得到平滑处理后的图像 $F(x, y)$ 。然后再使用二维拉普拉斯算子 ∇^2 来获取平滑处理之后的 $F(x, y)$ 的二阶方向导数图像 $M(x, y)$:

$$M(x, y) = \nabla^2 |F(x, y)| = \nabla^2 [G(x, y) \otimes f(x, y)] = [\nabla^2 G(x, y)] \otimes f(x, y), \quad (3)$$

式中 $\nabla^2 G(x, y)$ 即为 \log 算子,得到二阶方向导数函数图像 $M(x, y)$ 之后,对其求取零穿点轨迹便可得到原始图像 $f(x, y)$ 的边缘。

进行边缘检测后将会得到一系列边缘点,然后对这些边缘点进行最小二乘法圆拟合得到光斑中心。最小二乘法是在随机误差为正态分布时,由最大似然法推出的一个最优估计技术。其主要是寻找

参数集合,从而最小化数据点与圆之间的代数距离。

一般的圆方程式为:

$$(x-a)^2 + (y-b)^2 = r^2, \quad (4)$$

式中 a 、 b 为圆心的横纵坐标, r 为半径。那么残差平方和为:

$$Q = \sum_{i \in E} \epsilon_i^2 = \sum_{i \in E} [(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 - r^2]^2, \quad (5)$$

式中 ϵ_i 代指式中第 2 个等号右边中括号中的式子,无实际物理意义。

然后根据最小二乘法的原理,有:

$$\frac{\partial Q(a, b, r)}{\partial a} =$$

$$\sum 2(x_i^2 + y_i^2 + ax_i + by_i + c)x_i = 0, \quad (6)$$

$$\frac{\partial Q(a, b, r)}{\partial b} =$$

$$\sum 2(x_i^2 + y_i^2 + ax_i + by_i + c)y_i = 0, \quad (7)$$

$$\frac{\partial Q(a, b, r)}{\partial r} =$$

$$\sum 2(x_i^2 + y_i^2 + ax_i + by_i + c) = 0, \quad (8)$$

求出能够满足(6)~(8)式的参数 a 、 b 、 r ,便可以求出圆心坐标,即光斑中心坐标。然后,以该中心为基准,根据下式得到距离权重的分布:

$$W_{x,y} = \frac{1}{S} = \frac{1}{\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}}, \quad (9)$$

式中 (x, y) 为被测点像素坐标, (x_0, y_0) 为光斑中心位置坐标, S 为图像中某点 (x, y) 与光斑中心 (x_0, y_0) 之间的距离。

2.2 加权过程

得到权重函数 W 之后,便可以对 I 进行距离-幂指数加权,表达式为:

$$Ip_{x,y} = (I_{x,y} W_{x,y})^p, \quad (10)$$

式中参数 p 一般为幂指数, $p > 1$, 仿真模拟过程中对 p 进行优化之后确定 $p = 2.5$ 。使用幂指数加权时,理论上对于信噪比大于 1 的情况,加幂可以进一步提高信噪比^[15],但加幂过大也会导致光斑变形太大,反而引起误差。得到了经过加权之后的光强图像 Ip 后,将 Ip 代入(4)式,对加权之后的光强采用合适的阈值 I_{th} 进行处理。最后,根据(1)式使用基本质心法计算质心:

$$Ip_{x,y} = \begin{cases} 0, & Ip_{x,y} < I_{th} \\ Ip_{x,y}, & Ip_{x,y} \geq I_{th} \end{cases} \quad (11)$$

通过采用低信噪比对目标进行边缘检测和圆心拟合,初步计算出光斑的中心,再进行距离加权。并

以此为基础,通过采用幂指数加权来进一步减少光点周围非成像像素上的噪声干扰。

3 仿真结果及分析

实际应用中,夏克-哈特曼探测器子区域和当地的大气相干长度一致,而目标星等相对较弱、大气透过率低、天光背景等因素会导致探测子区域内光点信噪比低,本研究所模拟的情况即是针对这种低信噪比的情况。首先,利用傅里叶变换方法,对夏克-哈特曼探测器的单个子区域内的光斑进行模拟,结果如图 1 所示,对光斑所在的子区域进行归一化,定义子区域范围在 $-1 \sim +1$ 之间,图 1(a) 为采样前原始光斑,采样为 $400 \text{ pixel} \times 400 \text{ pixel}$,图 1(b) 为 CCD 采样后的光斑,采样为 $8 \text{ pixel} \times 8 \text{ pixel}$,图 1(c) 为信噪比为 5 dB 时 $8 \text{ pixel} \times 8 \text{ pixel}$ 的采样光斑。仿真过程中所加噪声为高斯白噪声。质心探测误差定义为:

$$E = \frac{N}{2} \sqrt{(x_c - x_{c0})^2 + (y_c - y_{c0})^2}, \quad (12)$$

式中 N 为 x 或 y 方向采样的像素数,图 1 中 $N = 8$; x_{c0} 和 y_{c0} 分别是图 1(a) 中原始光斑的质心; x_c 和 y_c 分别为对图 1(c) 光斑计算的质心。不同的质心算法得到的 x_c 和 y_c 不相同,可以利用(12)式来评价不同方法的误差,误差以 pixel 为单位。

模拟仿真结果如图 2 所示,其中自适应阈值法中采用各个光斑最大值的 12% 作为阈值;高斯加权法采用高斯函数进行加权;本研究对幂指数的选取经过模拟计算进行了优化对比,采用幂指数 2.5 进行处理;在距离-幂指数方法中,同样对幂指数的选取经过模拟计算进行了优化对比,采用幂指数 2 对距离加权后的光强进行处理。图 2(a) 为误差随着信噪比的变化趋势,模拟条件为:光斑大小 2.59 pixel , $8 \text{ pixel} \times 8 \text{ pixel}$ 采样,光斑在 x 轴偏移 0.2 pixel 。图 2(b) 为误差随光斑在 x 轴移动距离的变化趋势,模拟条件为:光斑大小 2.59 pixel , $8 \text{ pixel} \times 8 \text{ pixel}$ 采样,信噪比为 10 dB。图 2(c) 为误差随 CCD 采样频率的变化趋势,模拟条件为:光斑大小 2.59 pixel ,光斑在 x 轴偏移 0.2 pixel ,信噪比为 10 dB。图 2(d) 为误差随光斑大小的变化趋势,模拟条件为: $8 \text{ pixel} \times 8 \text{ pixel}$ 采样,光斑在 x 轴偏移 0.2 pixel ,信噪比为 10 dB。

从图 2 及表 1 所示的各算法在不同变量下的误差平均值可以看出,距离-幂指数算法在各个情况下的误差皆低于其他现有算法。在图 2(a) 中,随着信

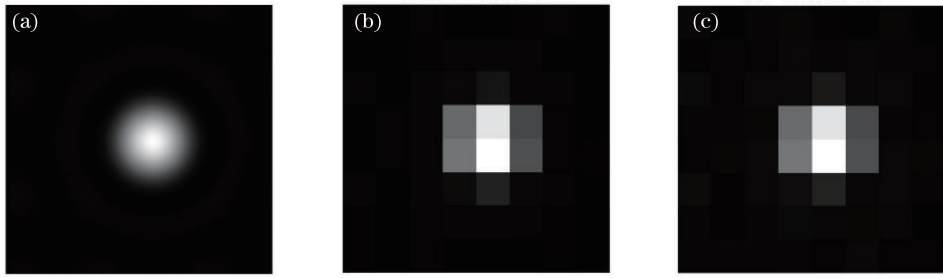


图1 模拟的光斑及其 CCD 采样。(a)原始光斑;(b)未加噪声的光斑;(c)加入噪声的光斑

Fig. 1 Simulated light spot and its image on CCD.

(a) Original light spot; (b) light spot without noise; (c) light spot with noise

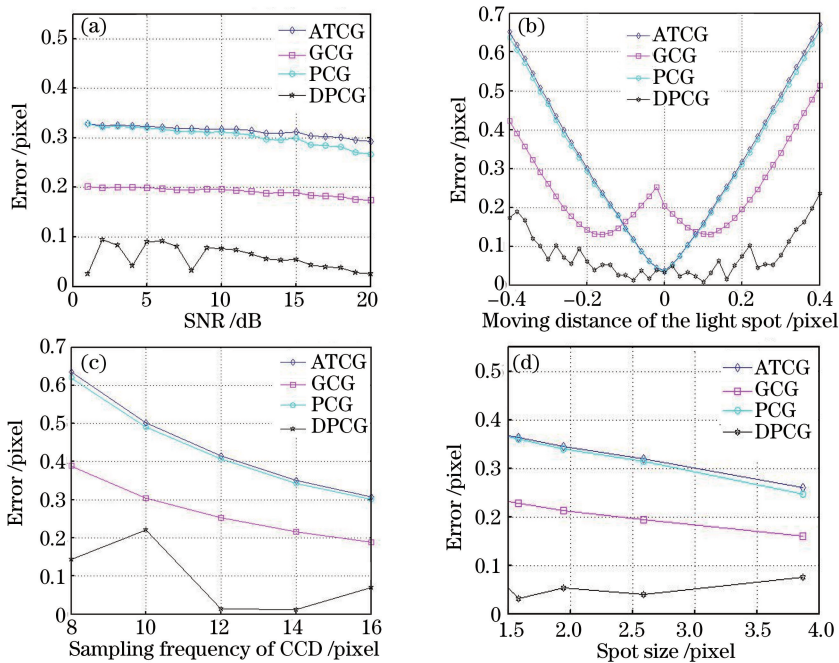


图2 各算法在不同情况下的计算误差变化图。(a)计算误差随信噪比的变化;(b)计算误差随光点移动距离的变化;
(c)计算误差随 CCD 采样频率的变化;(d)计算误差随光点大小的变化

Fig. 2 Calculation error of each algorithm under different cases. (a) Variation of calculation error with SNR;
(b) variation of calculation error with the moving distance of light spot; (c) variation of calculation error with
CCD sampling frequency; (d) variation of calculation error with spot size

噪比的增大,距离-幂指数方法的计算误差从最初的 0.011 pixel 下降到了 0.006 pixel,大约下降了 44.72%,在信噪比较小时,由于幂指数加权的原因,此时的误差虽起伏较大但整体仍远远低于其他算法。在图 2(b)中,随着移动距离增加,信号的质心和噪声的质心分离,噪声的质心基本在区域中心,因此距离增加时,噪声对质心计算的影响会明显,但从图 2(b)的结果可以看出,距离-幂指数法在光斑移动时对噪声的抑制也非常好。在图 2(c)中,质心计算误差随着子区域中像素的增加而减少,且距离-幂指数质心法的误差小于其他质心法,说明本方法对 CCD 空间采样频率并没有过高要求,意味着在不提高 CCD 空间采样频

率(即不增加计算时间)的情况下也能保持很高的计算精度,从而减少自适应光学系统的计算时间。在图 2(d)中,距离-幂指数质心法基本小于其他所有算法,并且结果比较稳定,误差都保持在 0.1 pixel 以下,有着很好的计算精度,并且不会因为光斑大小而对精度产生很大影响,非常适合较为多变的观测环境。

综上所述,由于其精准的边缘检测、距离和幂指数双重加权的优势,距离-幂指数算法首先能够得到光斑中心的位置,这使得后续的距离加权过程能够避免对远离光斑中心的噪声进行不必要的加权,进一步的幂指数加权过程提高了整个光斑图像的信噪比,从而使得该算法能够达到较高的精度。

表1 各算法在不同变量下的误差平均值
Table 1 Average error of each algorithm under different variables

pixel

Algorithm	Variable			
	SNR	Moving distance	CCD sampling frequency	Spot size
ATCG	6.2830	6.7298	2.2046	3.2447
GCG	3.8337	4.9326	1.3469	2.0478
PCG	6.0810	6.5736	2.1522	3.2113
DPCG	1.0155	1.3818	0.3588	0.7205

4 结 论

质心探测算法对波前探测器的探测精度有着非常大的影响,而在波前探测过程中,CCD的离散化以及 CCD 相机工作过程中难免会产生噪声以及误差,这是不可消除的,因而导致了波前探测器探测精度降低。所提出的距离-幂指数质心探测算法能比较有效地抑制噪声,从而提高夏克-哈特曼波前探测器的质心探测精度。将该算法在不同情况下进行仿真模拟,并与其他算法进行比较。结果显示,所提算法有效提高了波前探测器的质心探测精度,使得后续的波前重构工作的精度也得到提高,从而提升了整个自适应光学系统的畸变校正性能和成像能力。

参 考 文 献

- [1] Li J W, Chen W B. Bandwidth of adaptive optics system in satellite-ground coherent laser communication[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(8): 0806003.
李佳蔚, 陈卫标. 星地相干光通信中的自适应光学系统带宽研究[J]. 中国激光, 2016, 43(8): 0806003.
- [2] Chen B, Yang J, Li X Y, *et al.* Comparison of two close-loop control methods in adaptive optics with wavefront curvature sensing[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(3): 0301003.
陈波, 杨靖, 李新阳, 等. 波前曲率传感自适应光学两种闭环控制方法的对比[J]. 光学学报, 2016, 36(3): 0301003.
- [3] Xu Y, Man T L, Wan Y H. Research progress on adaptive wide-field microscopic imaging technology with high resolution [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(9): 090003.
徐洋, 满天龙, 万玉红. 自适应宽场高分辨率显微成像技术的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(9): 090003.
- [4] Li M X. Research on algorithms of Hartmann wavefront sensing operated with faint object[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016.

李明星. 弱信号哈特曼波前探测算法的研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.

- [5] 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.
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.
- [6] Poyneer L A. Correlation wave-front sensing algorithms for Shack-Hartmann-based adaptive optics using a point source[R/OL]. Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory, 2003. <https://e-reports-ext.llnl.gov/pdf/242712.pdf>.
- [7] Arines J, Ares J. Minimum variance centroid thresholding[J]. Optics Letters, 2002, 27(7): 497-499.
- [8] Liu D, Yu J. Otsu method and K-means [C]. International Conference on Hybrid Intelligent Systems, 2009: 344-349.
- [9] Bradley C, Hubin N, Lardière O, *et al.* Performance comparison of centroiding algorithms for laser guide star wavefront sensing with extremely large telescopes[J]. Applied Optics, 2010, 49(31): G78-G94.
- [10] Nicolle M, Fusco T, Rousset G, *et al.* Improvement of Shack-Hartmann wave-front sensor measurement for extreme adaptive optics [J]. Optics Letters, 2004, 29(23): 2743-2745.
- [11] Wang C C, Hu L F, Xu H Y, *et al.* Wavefront detection method of a single-sensor based adaptive optics system [J]. Optics Express, 2015, 23(16): 21403-21413.
- [12] Baik S, Park S, Kim C, *et al.* A center detection algorithm for Shack-Hartmann wavefront sensor[J]. Optics & Laser Technology, 2007, 39(2): 262-267.
- [13] Yan B, Wang B, Li Y. Optimal ellipse fitting method based on least-square principle[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 34(3): 295-298.

- 闫蓓, 王斌, 李媛. 基于最小二乘法的椭圆拟合改进算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2008, 34(3): 295-298.
- [14] Zhang T, Qi Y Q. MATLAB image processing programming and application [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2014: 139-150.
- 张涛, 齐永奇. MATLAB图像处理编程与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014: 139-150.
- [15] Xia M L. The development of high precision Hartmann wavefront detector for eye aberration[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2011.
- 夏明亮. 高精度人眼像差哈特曼探测器的研制[D]. 北京: 中国科学院大学, 2011.