

文章编号: 0258-7025(2009)02-0430-05

# Hartmann-Shack 波前传感器的自适应质心探测方法

梁 春 廖文和 沈建新 周 宇

(南京航空航天大学机电学院, 江苏 南京 210016)

**摘要** 在分析影响 Hartmann-Shack(H-S)传感器质心探测精度因素的基础上,提出结合自平方算法、大津算法、光斑位置区域自适应标定、回归局部阈值法等方法,给出一套适合波前像差测量的质心自适应探测方法,该方法具有准确、自适应性强的特点。经验证,与传统的质心探测方法相比,该方法能准确识别并保留更多的有效光斑信息,提高质心探测的精度,扩大 H-S 传感器的适用范围。

**关键词** 自适应光学; 波前传感器; 质心计算; 阈值

**中图分类号** TH703 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093602.0430

## An Adaptive Detecting Centroid Method for Hartmann-Shack Wavefront Sensor

Liang Chun Liao Wenhe Shen Jianxin Zhou Yu

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China)

**Abstract** A new adaptive method is given in this paper to detect the centroid of images caught by Hartmann-Shack (H-S) wavefront sensor after analyzing the reason of causing error. This method is based on the self-square arithmetic, Otsu arithmetic, light spots template matching and special threshold method in different sub-area. It is more accurate and adaptive than general methods. The experimental results show that more available information of light spots are kept through this way, which improves the accuracy of centroid detection and extends the applicability of H-S wavefront sensor.

**Key words** adaptive optics; wavefront sensor; centroid calculation; threshold

### 1 引言

自适应光学技术的雏形是 1953 年美国天文学家 Babcock<sup>[1]</sup>提出的采用闭环校正波前误差的方法,经过几十年的发展,已经在激光大气传输、天文目标观测、眼科医疗应用等方面发挥巨大作用<sup>[2~4]</sup>,许多国家都在自适应光学领域投入了巨大的精力。目前常用的自适应光学系统中的硬件主要包括波前传感器和波前校正器<sup>[5]</sup>。

在波前传感器中,Hartmann-Shack(H-S)传感器由于光能利用率高,可以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<sup>[6]</sup>,因而

应用最为广泛。作为自适应光学系统的关键部件,其探测误差是自适应光学系统的主要误差源<sup>[7]</sup>。在 H-S 传感器使用中,光斑质心的定位是波前复原算法的基础,本文以自适应抑噪滤波、阈值选取、光斑位置标定和二次局部阈值滤波为基础,提出了一套高精度的光斑质心自适应探测方法。

### 2 影响 H-S 传感器质心探测精度的因素

引起 H-S 波前传感器的测量结果误差的主要因素有两部分:一是质心探测的准确性,二是复原算

收稿日期: 2008-06-14; 收到修改稿日期: 2008-10-20

基金项目: 国家 863 计划(2006AA020804)资助课题。

作者简介: 梁 春(1977—),博士研究生,主要从事数字化设计制造及计算机辅助生物医学工程等方面研究。

E-mail: bloomlc@sina.com

导师简介: 廖文和(1965—),教授,博士生导师,主要从事计算机辅助设计/计算机辅助制造及数字医疗装备等方面的研究。E-mail: cnwho@nuaa.edu.cn

法的选取。对于后者,不同的波前复原算法和参数选取都会对复原误差产生影响,在此本文不予讨论。对于质心探测,其误差通常包括<sup>[8,9]</sup>:

1) CCD 离散采样(如 CCD 像素之间死区, CCD 像素响应的非均匀性)引起的误差;

2) 光量子起伏噪声,由光信号本身存在的光子起伏引起的随机噪声,符合泊松分布;

3) 背景噪声,由 CCD 偏置电平带来的噪声,一般可认为是常数;

4) 背景干扰杂光,一般由系统光路中的杂光引起;

5) CCD 读出噪声,包括 A/D 转换等引起的随机噪声,符合高斯分布。

一般 H-S 传感器在使用时光斑占像素较多,因此误差 1) 对质心探测精度影响很小,误差 2) 在弱光信号时才会对探测结果有较明显影响。第 3), 4), 5) 种误差都与光斑信号互不相关,是相互独立噪声。该部分噪声可以通过设置合适的阈值滤除,但当光斑强度不均匀时和噪声点亮度接近光斑亮度时,阈值法会降低图像信号质量,损失有效信息,对质心探测造成误差。

### 3 提高 H-S 传感器质心探测精度的方法

提高 H-S 传感器质心探测精度,除了建立合适的光路系统外,后期图像的滤波降噪处理是重要途径。根据 H-S 传感器捕获图像的特点,通常借用图像处理中的一些方法对图像进行预处理,以抑止噪声对信号的混淆,提高质心计算精度。其中常用的方法包括抑噪滤波和阈值法。

#### 3.1 光斑图抑噪滤波

抑噪滤波通常用于对光斑图的预处理,用来明显减少噪声和降低噪声点灰度值。在 H-S 传感器获得的光斑图中,由于散斑和其他因素常常造成光斑亮度不均匀,并存在一些高亮度的噪声点,这些噪声点的亮度往往接近甚至超过部分光斑,很难直接滤除,容易对光斑判定和定位造成混淆,抑噪预处理对这些噪声有明显的抑制能力。常用的方法有邻域平均、自平方和平方算法等,其中以自平方算法效果较为理想<sup>[10]</sup>。

#### 3.2 阈值法

阈值法处理图像是选取合适的阈值将图像分割成前景和背景两部分,提取前景部分作为有效信息。对于 H-S 传感器捕获的光斑图片,有效光斑信息就

是前景部分,而噪声点则是需要被归入背景加以滤除的部分,选取合适的阈值可以有效滤除不相干的噪声信号,但是如何选取合适阈值是一个重要过程。对于传感器得到的光斑图,多采用基于像素点的全局阈值法,常用的有基于灰度直方图统计的经验值法、迭代法、最大类间方差法等。

1) 基于灰度直方图统计的经验值法。采集一系列典型图片进行灰度直方图统计,绘出阈值与光斑质心探测精度关系曲线,再选出合适的阈值作为以后处理的参考基准。这种方法只适用于噪声变化时域性不大的情况,且前期预处理的时间较长,对于噪声变化复杂的情况效果不理想。

2) 迭代法。设定图像最大最小灰度值的平均数为初始阈值  $T_0$ , 阈值  $T(i)$  将图像分为前景和背景,  $u, v$  为分别为前景和背景的平均灰度等级, 取  $T(i+1) = (u+v)/2$ , 当迭代到  $T(i+1) = T(i)$  时停止, 取该值为最佳阈值。该方法对图像的分割效果较好, 能分割出大部分前景, 但当图像目标和背景比例差异悬殊时, 结果稳定性较差。

3) 最大类间方差法。1978 年由天津(Otsu)<sup>[11]</sup> 提出, 其思路为任意阈值可将图像灰度值分作两类, 分别计算两部分图像灰度分布的均值, 历遍所有灰度值, 使两部分灰度均值与图像整体灰度均值相距最大的即为图像分割的最佳阈值。该方法的实际意义是使类间方差最大的阈值分割。天津法获得的阈值具有较强自适应性, 计算结果较稳定。

### 4 H-S 传感器质心探测自适应方法

在分析了影响 H-S 传感器质心探测精度因素和各种提高精度方法后可以看出, 单一的方法均存在一定的局限, 无法有效地处理各种光斑图, 限制了传感器的使用范围。本文在传统提高质心探测精度方法的基础上, 结合光斑图像自身特点, 提出了一套全面的自适应质心探测方法, 适用面广, 对各种状态下的光斑图均有较强的适应性, 对许多单一方法无法有效准确处理的光斑图有着很好的适应能力。

#### 4.1 基于自平方算法的抑噪预处理

光斑抑噪预处理对于抑制光斑图中的噪声点有着较好的效果, 本文采用其中效果较好的自平方算法, 其基本思路是将光斑图的第 1 列像素的灰度值乘以该幅图像的第 2 列像素的灰度值, 其结果作为第 1 列像素的灰度值, 第 2 列乘以第 3 列, 依次下去, 直到最后一列, 最后一列乘以第 1 列。公式为

$$t(u, v) = \begin{cases} t(u, v) \cdot t(u, v + 1), & 1 \leq u \leq r, 1 \leq v < c \\ t(u, v) \cdot t(u, 1), & 1 \leq u \leq r, v = c \end{cases} \quad (1)$$

式中  $r, c$  表示为图像行数和列数,  $u$  为像素点的行,  $v$  表示像素点的列,  $t(u, v)$  表示该像素点的灰度值。

经该方法后, 光斑图中的噪声被有效抑制, 特别是有效排除了部分高亮度噪声点对质心探测可能造成的混淆, 也减少了噪声奇点对后续阈值计算带来的负面影响。

#### 4.2 基于 Otsu 算法的阈值自适应选取

由于 Otsu 算法有较好的自适应性, 结果稳定, 并且针对光斑图的特点有着很好的噪声滤除效果, 在此采用该算法计算阈值。Otsu 算法阈值计算公式为

$$g = \text{Arg} \max_{0 \leq t \leq m-1} \{ \omega_0(t) [\mu_0(t) - \mu]^2 + \omega_1(t) [\mu_1(t) - \mu]^2 \}, \quad (2)$$

式中

$$\begin{aligned} \omega_0(t) &= \sum_{0 \leq i \leq t} p(i), \\ \omega_1(t) &= \sum_{t < i \leq m-1} p(i), \\ \mu_0(t) &= \sum_{0 \leq i \leq t} i p(i) / \omega_0(t), \\ \mu_1(t) &= \sum_{t < i \leq m-1} i p(i) / \omega_1(t), \\ \mu &= \omega_0(t) \mu_0(t) + \omega_1(t) \mu_1(t), \end{aligned}$$

$g$  为所求阈值结果,  $m$  为图像的灰度级,  $t$  为分割图像灰度值的门限值,  $p(i)$  为灰度出现的频数。

由于 Otsu 法在光斑有效信息占整幅图像小于 20% 时计算出的阈值结果偏大<sup>[12]</sup>, 因此噪声点滤除的较为彻底, 不过同时也对有效光斑信息损伤较多, 这可以通过后面的回归处理来改善。

#### 4.3 基于圆心探测的模板自适应标定

经过抑噪和阈值法的光斑图, 大部分噪声点已经被滤除, 对剩余的光斑图像做定位处理。在本文所采用的 H-S 传感器中, 微透镜阵列的排列方法是正六边形, 对满足光斑条件的边缘六个点进行捕获, 取其中任意 3 点计算外接圆半径, 设定一个合适的误差值, 当满足条件时, 就可以确定包含所有光斑范围的圆域, 再根据微透镜阵列中微透镜模板的相关参数即可标定光斑的近似位置, 然后选择合适的范围即可确定模板, 该模板对应包含了每一个实际光斑的空间范围。当微透镜阵列为其他排列模式时, 可根据实际情况选取合适的定位条件来标定模板。

#### 4.4 回归局部阈值滤波

光斑图所占信息相对整个图像较少时, Otsu 法计算的阈值会使光斑信息损伤较多, 且自平方法也会造成光斑边缘点信号损失, 都会对质心探测造成误差, 因此还需要对原始图像进行回归, 还原被误清除的有效信息。

在模板位置标定后, 将未经处理的原始光斑图对应模板外的区域灰度值全部置零, 设为背景, 将每个模板标定的局部范围内包含的光斑信息重新进行处理, 结合光斑判定条件后对原始图像每个光斑附近区域的局部图像进行单独阈值计算, 此时由于局部范围内光斑所占有效信息较大, 采用 Otsu 法计算的阈值较为合适, 因此局部阈值计算仍采用 Otsu 法。通过这种回归原始光斑图后的局部阈值滤波, 最大程度上保留每个光斑有效信息, 保证了质心探测精度。

### 5 实验验证

为验证本文方法, 选取了一系列图像进行处理结果对比, 图 1 是对其中一幅处理过程进行的详细分析。其中图 1(a) 是未加噪声干扰的原始光斑图, 光斑亮度不均匀, 基本无噪声点; 图 1(b) 是加背景噪声干扰的光斑图, 部分噪声点的亮度超过部分光斑亮度; 图 1(c) 是自平方法抑噪后光斑图, 噪声抑制明显; 图 1(d) 是光斑抑噪后使用 Otsu 算法计算全局阈值过滤后的结果, 噪声点基本被滤除, 但同时不少有效光斑信息被过滤; 图 1(e) 是圆心探测后的模板位置标定; 图 1(f) 是回归原始图像后对局部光斑内部分别进行阈值滤波的结果, 噪声点有效滤除, 有效光斑信息保留较全。图 2 为直接使用阈值法滤波和使用本文方法处理的某光斑局部的光强分布对比图, 显然本文方法保留了原始光斑更多的有效信息。

在各种方法处理的基础上, 对比各光斑质心计算误差, 图 3 是一幅光斑图中截取的 37 个光斑处理结果的对比, 图 3 中曲线表示使用阈值法滤波、自平方基础上使用阈值法以及本文方法分别计算各光斑的质心值误差(与原始未加噪声光斑图计算结果对比), 可以看出本文方法的计算结果误差最小, 最大质心探测误差不超过 0.2 pixel, 而其他方法的误差最多可达 1.1 pixel。除图 1(a) 所示图形外, 对其他一系列光斑图的处理都得到了类似结果, 表明本文方法可有效提高质心探测精度。

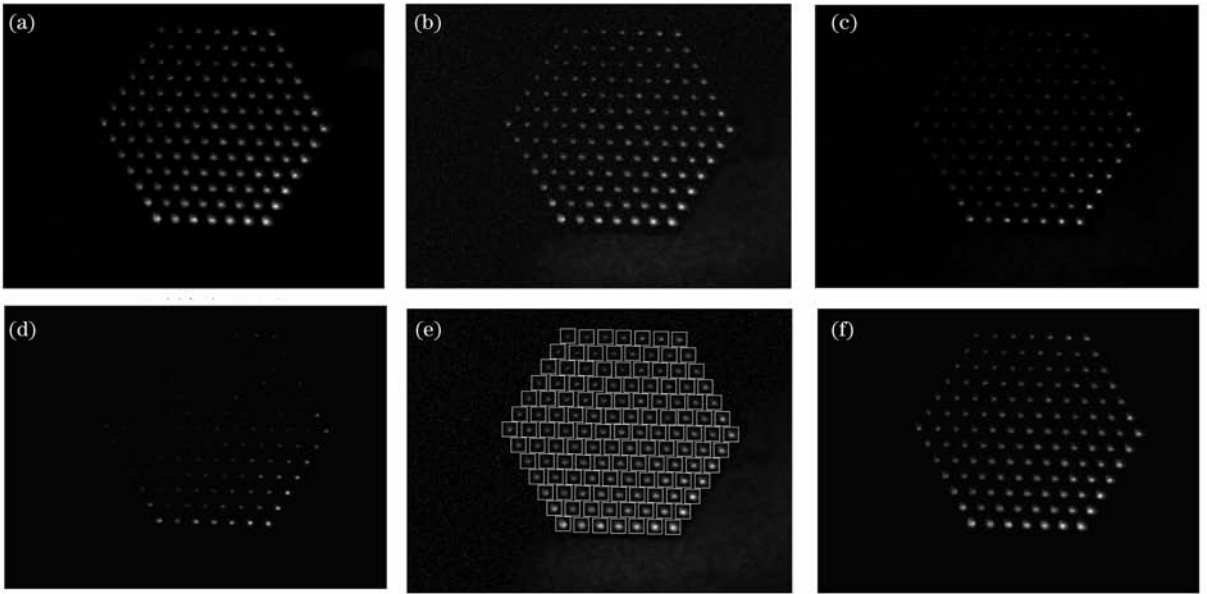


图 1 光斑图处理流程。(a) 原始光斑图；(b) 加噪声后的光斑图；(c) 自平方抑噪后光斑图；(d) 大津法滤波后光斑图；(e) 光斑模板定位；(f) 处理后光斑图

Fig. 1 Processing of the light spot image. (a) Original image; (b) image with noise; (c) image after self-square filtering; (d) image after Otsu filtering; (e) light spot template matching; (f) processed image

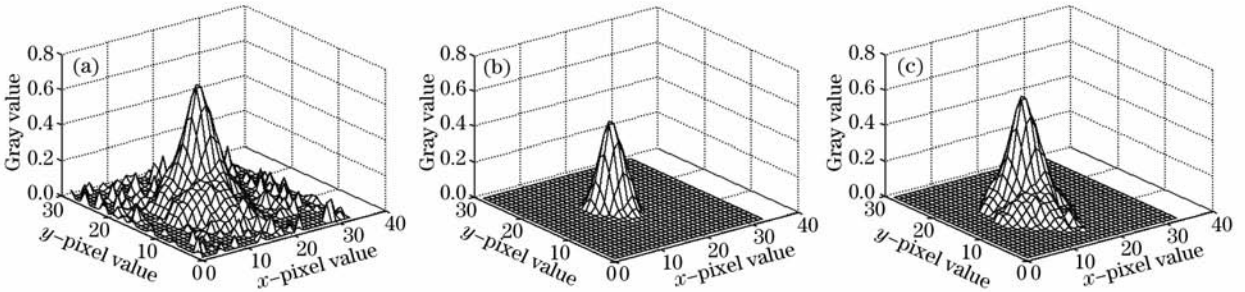


图 2 单个子孔径光斑光强分布比较。(a) 原始图；(b) 直接阈值法滤波后；(c) 本文方法处理后

Fig. 2 Companson of light intensity distribution in single subaperture. (a) Original image; (b) after general threshold filtering; (c) the context method

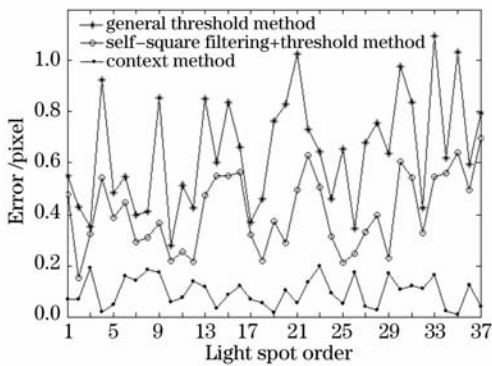


图 3 质心探测误差对比

Fig. 3 Error of detecting centroid

波前复原的重要因素,由于实验条件和硬件原因,捕获的光斑图中不同程度地存在噪声,这些噪声会对光斑的捕获和质心计算产生影响,常用的阈值法在一定条件下能有效滤除噪声,但在光斑不均匀,噪声情况较复杂的情况下会对有效信息造成较大损伤,甚至造成有效光斑缺失。本文在分析噪声和光斑图特点的基础上,给出一套自适应质心探测新方法,经实验验证,该方法能显著降低噪声对有效光斑信息的干扰和混淆,提高光斑信息的利用率,有效减少质心探测误差,为波前复原提供了高精度的质心定位,同时也扩大了 H-S 传感器的适用范围。

参 考 文 献

1 Babcock H. W., The possibility of compensating astronomical seeing[J]. *Publ. Astron. Soc. Pac.*, 1953, **65**: 229~236

6 结 论

H-S 传感器的工作原理决定了质心探测是影响

- 2 Cao Zhaoliang, Mu Quanquan, Hu Lifa. Design on liquid crystal adaptive optical system for 600 mm telescope[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6): 1147~1150  
曹召良,穆全全,胡立发. 600 mm 望远镜液晶自适应系统成像光路设计[J]. *光学学报*, 2007, **27**(6): 1147~1150
- 3 Yang Ping, Xu Bing, Jiang Wenhan. Study of a genetic algorithm used in an adaptive optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9): 1628~1632  
杨平,许冰,姜文汉等. 遗传算法在自适应光学系统中的应用[J]. *光学学报*, 2007, **27**(9): 1628~1632
- 4 Xue Lixia, Rao Xuejun, Wang Cheng. Higher-order aberrations correction and vision analysis system for human eye[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5): 893~897  
薛丽霞,饶学军,王成. 人眼高阶像差校正和视觉分析系统[J]. *光学学报*, 2007, **27**(5): 893~897
- 5 Yang Ping, Ao Mingwu, Liu Yuan *et al.*. Adaptive optics genetic algorithm based on Zernike mode coefficients[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3): 367~372  
杨平,敖明武,刘渊等. 基于泽尼克模式系数的自适应光学遗传算法[J]. *中国激光*, 2008, **35**(3): 367~372
- 6 Duan Haifeng, Yang Zeping, Wang Shuqing *et al.*. Model wavefront reconstruction of Shack-Hartmann sensor on arbitrary area and wavefront expression by Zernike polynomials [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **29**(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
- 7 Shen Feng, Jiang Wenhan. A method for improving the centroid sensing accuracy threshold of Hartmann wavefront sensor[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1997, **24**(3): 1~8  
沈峰,姜文汉. 提高 Hartmann-Shack 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
- 8 Shen Feng, Jiang Wenhan. The measurement error of wavefront phase with Shack-Hartmann wavefront sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(5): 666~671  
沈峰,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
- 9 Jiang Wenhan, Xian Hao, Shen Feng. Detecting error of Shack-Hartmann wavefront sensor [J]. *Chinese J. Quantum Electronics*, 1998, **15**(2): 193~199  
姜文汉,鲜浩,沈峰. Shack-Hartmann 波前传感器的探测误差[J]. *量子电子学报*, 1998, **15**(2): 193~199
- 10 Wang Wei, Chen Huaixin. Inhibiting noise of light spot image [J]. *Laser Technology*, 2007, **31**(1): 55~60  
王薇,陈怀新. 光斑图抑噪预处理的方法研究[J]. *激光技术*, 2007, **31**(1): 55~60
- 11 Otsu N.. Discriminant and Least Square Threshold Selection [M]. *Proc 4IJCP*, 1978. 592~596
- 12 Ren Jianfeng, Rao Changhui, Li mingquan. An adaptive threshold selection method for Hartmann-Shack wavefront sensor [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2002, **29**(1): 1~5  
任剑峰,饶长辉,李明全. 一种 Hartmann-Shack 波前传感器图像的自适应阈值选取方法[J]. *光电工程*, 2002, **29**(1): 1~5