

光斑区域内存在单个盲元条件下点源目标质心探测误差分析

王少白^{1,2,3} 王春鸿^{1,2} 饶长辉^{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 100049

摘要 在哈特曼波前传感器点源目标探测质心算法中,除信号光子噪声、读出噪声和背景光噪声等误差源之外,图像传感器上存在的盲元也会对质心的探测精度造成一定的影响。系统地推导了哈特曼传感器子孔径光斑区域内存在单个盲元条件下各种误差源对点源目标质心探测误差影响的数学表达式,进一步分析了盲元和光斑质心间相对距离、光斑等效高斯宽度等因素对盲元存在所引入的质心偏移误差的影响,指出当相对距离约等于光斑高斯宽度时质心偏移误差达到最大值。实验结果与仿真和理论推导结果相符。

关键词 自适应光学;探测器;质心探测误差;误差分析;单个盲元;点源

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP49.030101

Centroid Detection Error Analysis of a Point Source with a Single Blind Pixel in Spot Area

Wang Shaobai^{1,2,3} Wang Chunhong^{1,2} Rao Changhui^{1,2}

¹Laboratory on Adaptive Optics, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China
²Key Laboratory on Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China
³Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In the detection of a point source with Hartmann wavefront sensor, besides the normal noise sources such as signal photon noise, readout noise and background noise, the blind pixels existing on the image sensor may also introduce centroid detection error. The integral formula of centroid detection error in the presence of a single blind pixel in the spot area is put forward. Furthermore, analysis about the two influence factors of centroid displacement error induced by single blind pixel, i. e., the distance between single blind pixel and spot center and the Gaussian width of the spot is presented. The simulation and experimental results are in accordance with the theoretical analysis.

Key words adaptive optics; detectors; centroid detection error; error analysis; single blind pixel; point source

OCIS codes 010.7350; 030.4280; 040.1520; 110.1080

1 引言

在自适应光学系统等应用哈特曼波前传感器的场合,通常采用质心算法探测点源目标位置,因此质心探测精度直接关系到系统的精度^[1~5]。关于哈特曼波前传感器的质心探测精度,文献[5~8]详细分析了信号光子噪声、读出噪声、背景光噪声、背景暗电平和采样误差等误差源对质心探测误差的影响,并提出以背景均

收稿日期: 2011-09-28; 收到修改稿日期: 2011-11-10; 网络出版日期: 2012-01-12

基金项目: 国家 863 计划(2008AA02Z422)资助课题。

作者简介: 王少白(1985—),男,博士研究生,主要从事自适应光学波前处理技术方面的研究。

E-mail: numustc@sina.com

导师简介: 饶长辉(1971—),男,研究员,主要从事自适应光学技术方面的研究。E-mail: chrao@ioe.ac.cn

值加三倍噪声起伏作为最佳阈值,对光斑图像进行减阈值操作后再计算质心可以将质心探测误差降低到最小程度。在实际应用中,探测点源目标位置时通常使用 CCD 或 CMOS 图像传感器获取目标的光斑图像,而图像传感器靶面上经常会存在一定数量的盲元,在 CMOS 传感器上这种现象尤其明显。当光斑落在探测器靶面上存在盲元的区域内时,除上述误差源影响之外,这些盲元的存在不可避免地会对质心探测带来一定的误差。

本文在前人对于质心探测误差研究的基础上,推导了当哈特曼传感器子孔径的光斑所在区域内存在单个盲元条件下信号光子噪声、读出噪声、背景光噪声、背景暗电平和采样误差等误差源对质心探测误差影响的数学表达式,分析了盲元与光斑质心间相对距离和光斑高斯宽度大小对单个盲元引入的附加质心偏移误差的影响,并给出了仿真和实验结果。

2 盲元定义和质心探测的各种误差源

2.1 盲元定义

盲元也被称为无效像元,可分为过热像元和死像元两种^[9],是指图像传感器靶面上响应过高或过低的探测器单元,在读出图像上表现为异常的亮点或暗点。盲元的值已经不能作为该处光强的表征信息直接用于后续计算,必须通过一定的手段进行处理。当盲元个数较少时,可以直接将盲元丢弃不参与质心运算,这就造成盲元所在区域处光强信息的缺失,必然会给质心计算精度带来一定的误差。

2.2 质心探测的各种误差源

点源目标质心探测的误差源主要如下^[8]。

- 1) 信号光子噪声:服从泊松分布,方差为 $\sigma_{psj}^2 = \overline{N_{sj}}$;
- 2) 背景光噪声:服从泊松分布,方差为 $\sigma_{bsj}^2 = \overline{N_{bsj}}$;
- 3) 图像传感器读出噪声:服从零均值高斯分布,方差为 $\sigma_{rj}^2 = \sigma_r^2$;
- 4) 图像传感器的背景暗电平:为一个固定的直流电平 $\overline{N_{dj}}$;
- 5) 图像传感器的离散采样误差:与光斑大小直接相关。

其中 $\overline{N_{sj}}$ 是第 (i, j) 个像元接收到的平均信号光子数, $\overline{N_{bsj}}$ 是第 (i, j) 个像元接收到的平均背景光子数, σ_r 是图像传感器的读出噪声均方差。

背景光噪声服从泊松分布,但是当背景光光子数的均值大于 10 时,可以看作均值和方差都为平均值的高斯分布^[10]。因此,可以将背景光噪声、读出噪声和背景暗电平三类噪声源合并为背景噪声源 $N_{Bij} = N_{bsj} + N_{dj} + N_{rj}$,服从均值为 $\overline{N_{Bij}} = \overline{N_{bsj}} + \overline{N_{dj}}$,方差为 $\sigma_B^2 = \sigma_r^2 + \overline{N_{bsj}}$ 的高斯分布。

3 光斑区域内存在单个盲元条件下总的质心探测误差

由于一阶矩质心算法中 x 方向与 y 方向对称,因此下面对单个子孔径内 x 方向上的误差情况进行分析, y 方向情况完全类似。

当该子孔径内不存在盲元时, x 方向质心计算公式为

$$x_c = \frac{U}{V} = \frac{\sum_{i,j}^{L,M} x_i N_{i,j}}{\sum_{i,j}^{L,M} N_{i,j}}, \quad (1)$$

式中 N_{ij} 为子孔径内坐标为 (i, j) 处的像元接收到的总光子数, x_i 为像元位置, L, M 表示子孔径窗口大小。

存在单个盲元时,设盲元坐标为 (i_0, j_0) ,质心运算中对应坐标为 (x_{i_0}, y_{j_0}) , $N_{i_0 j_0}$ 表示该盲元为正常像元时应有的读出值, $\{R\}$ 为子孔径内正常像元的集合。

定义 $U_R = \sum_{(R)} x_i N_{ij}$, $V_R = \sum_{(R)} N_{ij}$, 则有 $U = U_R + x_{i_0} N_{i_0 j_0}$, $V = V_R + N_{i_0 j_0}$ 。

3.1 质心偏移误差

在质心运算中,将盲元置零后计算得到质心为

$$x_R = \frac{U_R}{V_R}. \quad (2)$$

质心偏移误差 σ_p 定义为 x_R 与光斑的真实质心位置 x_p 之差:

$$\sigma_p = x_R - x_p = (x_R - x_c) - (x_p - x_c). \quad (3)$$

由于盲元存在所造成的质心偏移误差为

$$\Delta x_c = x_R - x_c = \frac{N_{i_0 j_0} (x_c - x_{i_0})}{V_R}. \quad (4)$$

根据文献[8]的结论,有

$$x_p - x_c = \frac{V_B}{V} (x_s - x_B) - \sigma_s, \quad (5)$$

式中 $x_s = \frac{\sum_{ij}^{L,M} x_i N_{sij}}{\sum_{ij}^{L,M} N_{sij}}$ 为信号光质心, $x_B = \frac{\sum_{ij}^{L,M} x_i N_{bij}}{\sum_{ij}^{L,M} N_{bij}}$ 为背景噪声质心, $\sigma_s = x_s - x_p$ 为采样误差。

于是可以得到存在单个盲元条件下的质心偏移误差为

$$\sigma_p = \frac{N_{i_0 j_0} (x_c - x_{i_0})}{V_R} - \frac{V_B}{V} (x_s - x_B) + \sigma_s. \quad (6)$$

3.2 质心抖动误差

引起质心抖动误差的误差源主要有信号光子噪声、背景光子噪声和图像传感器读出噪声^[8]。根据误差理论可得 x_R 的抖动方差为

$$\sigma_{x_R}^2 = \frac{U_R^2}{V_R^4} \sigma_{V_R}^2 + \frac{1}{V_R^2} \sigma_{U_R}^2 - \frac{2U_R}{V_R^3} \sigma_{U_R V_R}. \quad (7)$$

认为各个像元间噪声互不相关,可以得到

$$\begin{cases} \sigma_{U_R}^2 = \sum_{\langle R \rangle} x_i^2 \sigma_{ij}^2 = \sum_{i,j}^{L,M} x_i^2 \sigma_{ij}^2 - x_{i_0}^2 \sigma_{i_0 j_0}^2 \\ \sigma_{V_R}^2 = \sum_{\langle R \rangle} \sigma_{ij}^2 = \sum_{i,j}^{L,M} \sigma_{ij}^2 - \sigma_{i_0 j_0}^2 \\ \sigma_{U_R V_R} = \sum_{\langle R \rangle} x_i \sigma_{ij}^2 = \sum_{i,j}^{L,M} x_i \sigma_{ij}^2 - x_{i_0} \sigma_{i_0 j_0}^2 \end{cases}, \quad (8)$$

式中 σ_{ij}^2 是第 (i, j) 个像元上的噪声方差。于是可得

$$\sigma_{x_R}^2 = \sigma_\alpha^2 - \sigma_\beta^2, \quad (9)$$

式中 $\sigma_\alpha^2 = \frac{U_R^2}{V_R^4} \sum_{i,j}^{L,M} \sigma_{i,j}^2 + \frac{1}{V_R^2} \sum_{i,j}^{L,M} x_i^2 \sigma_{i,j}^2 - \frac{2U_R}{V_R^3} \sum_{i,j}^{L,M} x_i \sigma_{i,j}^2$, $\sigma_\beta^2 = \frac{U_R^2}{V_R^4} \sigma_{i_0 j_0}^2 + \frac{1}{V_R^2} x_{i_0}^2 \sigma_{i_0 j_0}^2 - \frac{2U_R}{V_R^3} x_{i_0} \sigma_{i_0 j_0}^2$ 。认为各个噪声源互不相关,则有 $\sigma_{ij}^2 = \overline{N_{sij}} + \overline{N_{bij}} + \sigma_r^2$ 。

只考虑信号光光子噪声时, $\sigma_{ij}^2 = \overline{N_{sij}}$, 根据文献[2]中相关结论推导可得

$$\sigma_{\alpha_s}^2 = \frac{V \sigma_A^2}{V_R^2} + \sigma_\epsilon^2, \quad (10)$$

式中 σ_A 为光斑的等效高斯宽度, $\sigma_\epsilon^2 = \frac{1}{V_R^2} (V x_R^2 + U x_c - 2U x_R)$ 。

只考虑读出噪声时, $\sigma_{ij}^2 = \sigma_r^2$, 有^[6]

$$\sigma_{\alpha_r}^2 = \frac{LM \sigma_r^2}{V_R^2} \left(\frac{L^2 - 1}{12} + x_R^2 \right). \quad (11)$$

只考虑背景光光子噪声时, $\sigma_{ij}^2 = \overline{N_{bij}}$, 有^[8]

$$\sigma_{\alpha_b}^2 = \frac{V_b}{V_R^2} \left(\frac{L^2 - 1}{12} + x_R^2 \right). \quad (12)$$

于是可以得到总的质心抖动方差为

$$\sigma_{x_R}^2 = \sigma_{a_b}^2 + \sigma_{a_r}^2 + \sigma_{a_s}^2 - \sigma_{\beta}^2 = \frac{\sigma_B^2 LM}{V_R^2} \left(\frac{L^2 - 1}{12} + x_R^2 \right) + \frac{V\sigma_A^2}{V_R^2} + \sigma_{\epsilon}^2 - \sigma_{\beta}^2. \quad (13)$$

3.3 总的质心探测误差

总的质心误差定义为质心偏移误差的方差和质心抖动误差的方差之和:

$$\sigma_x^2 = \sigma_p^2 + \sigma_{x_R}^2 = \left[\frac{N_{i_0 j_0} (x_c - x_{i_0})}{V_R} - \frac{V_B}{V} (x_s - x_B) + \sigma_s \right]^2 + \frac{\sigma_B^2 LM}{V_R^2} \left(\frac{L^2 - 1}{12} + x_R^2 \right) + \frac{V\sigma_A^2}{V_R^2} + \sigma_{\epsilon}^2 - \sigma_{\beta}^2. \quad (14)$$

当盲元不存在时,上式退化成为

$$\sigma_x^2 = \left[\frac{V_B}{V} (x_s - x_B) - \sigma_s \right]^2 + \frac{\sigma_B^2 LM}{V^2} \left(\frac{L^2 - 1}{12} + x_c^2 \right) + \frac{\sigma_A^2}{V}. \quad (15)$$

(15)式与文献[6~8]中关于点源目标质心探测误差的结论相一致。

定义图像传感器的光电响应系数 κ 为一个光子事件导致的 ADU 数 (ADU 为模数转换单位),用灰度值 (ADU) 表示 N_{ij} , $V, V_B, V_R, \sigma_B^2, \sigma_{\epsilon}^2, \sigma_{\beta}^2$, 则(14)式可表达为如下形式:

$$\sigma_x^2 = \left[\frac{N_{i_0 j_0} (x_c - x_{i_0})}{V_R} - \frac{V_B}{V} (x_s - x_B) + \sigma_s \right]^2 + \frac{\sigma_B^2 LM}{V_R^2} \left(\frac{L^2 - 1}{12} + x_R^2 \right) + \frac{\kappa V \sigma_A^2}{V_R^2} + \kappa \sigma_{\epsilon}^2 - \sigma_{\beta}^2. \quad (16)$$

4 单个盲元引入的附加质心偏移误差

对总的质心误差表达式进行分析,可见盲元的存在相当于在原先质心误差的基础上引入了新的误差,主要表现为 $\Delta x_c, \sigma_{\epsilon}^2$ 和 σ_{β}^2 等项,其中 Δx_c 可以看作由于盲元处光强信息的缺失对质心计算造成的附加质心偏移误差, σ_{ϵ}^2 和 σ_{β}^2 则是由于盲元处光强信息的缺失而引入的附加质心抖动误差。由于 σ_{ϵ}^2 和 σ_{β}^2 相对较小可以忽略不计,下面主要对盲元存在引入的附加质心偏移误差 Δx_c 和 Δy_c 进行分析。

为更好地表示单个盲元存在所引入的附加质心偏移误差,定义

$$\Delta C = \sqrt{(\Delta x_c)^2 + (\Delta y_c)^2} = \frac{\rho_0 N_{i_0 j_0}}{V - N_{i_0 j_0}}, \quad (17)$$

式中 $\rho_0 = \sqrt{(x_c - x_{i_0})^2 + (y_c - y_{j_0})^2}$ 表示盲元位置与光斑质心位置的相对距离。

当光斑等效高斯宽度大于 0.5 pixel 时,采样误差可以忽略^[6],则有 $\rho_0 = \sqrt{(x_p - x_{i_0})^2 + (y_p - y_{j_0})^2}$ 。

点源目标在哈特曼波前传感器子孔径中成像光斑的光强分布可用二维高斯分布来近似,其分布函数表示为^[11]

$$I(x, y) = \frac{V}{2\pi\sigma_A^2} \exp\left[-\frac{(x - x_p)^2 + (y - y_p)^2}{2\sigma_A^2}\right], \quad (18)$$

式中 V 为总光强, σ_A 为光斑的等效高斯宽度, (x_p, y_p) 为光斑的真实质心位置。

由于图像传感器的离散采样,坐标为 (x_i, y_j) 的像元收集到的光子数为

$$N_{ij} = \int_{y_j - 0.5}^{y_j + 0.5} \int_{x_i - 0.5}^{x_i + 0.5} I(x, y) dx dy = \frac{V}{4} \left[\operatorname{erf}\left(\frac{x_i + 0.5 - x_p}{\sqrt{2}\sigma_A}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{x_i - 0.5 - x_p}{\sqrt{2}\sigma_A}\right) \right] \left[\operatorname{erf}\left(\frac{y_j + 0.5 - y_p}{\sqrt{2}\sigma_A}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{y_j - 0.5 - y_p}{\sqrt{2}\sigma_A}\right) \right]. \quad (19)$$

为了更清晰地表示 ρ_0 和 ΔC 的关系,近似认为像元形状为圆形,圆心坐标为 (x_i, y_j) ,半径为 0.5,如图 1 所示。

于是(19)式可以表示为

$$N_{i_0 j_0} = \int_0^{0.52\pi} \int_0^{\rho_0} \frac{V}{2\pi\sigma_A^2} \exp\left(-\frac{\rho_0^2 + \rho^2 - 2\rho_0\rho\cos\beta}{2\sigma_A^2}\right) d\beta d\rho. \quad (20)$$

由(20)式可以看出 $N_{i_0 j_0}$ 只与 ρ_0 有关,且随 ρ_0 增大而减小。进而有

$$\Delta C = \rho_0 \left\{ \left[\int_0^{0.52\pi} \int_0^{\rho_0} \frac{1}{2\pi\sigma_A^2} \exp\left(-\frac{\rho_0^2 + \rho^2 - 2\rho_0\rho\cos\beta}{2\sigma_A^2}\right) d\beta d\rho \right]^{-1} - 1 \right\}^{-1}. \quad (21)$$

分析(21)式可知:在 σ_A 一定的情况下, ΔC 只与 ρ_0 有关,随着 ρ_0 的增大, ΔC 先增大后减小,在某个 ρ_0 处存在 ΔC 的极大值点;对应一定的 ρ_0 ,随着 σ_A 增大, $N_{i_0 j_0}$ 减小,从而导致 ΔC 减小。

对上面结论的物理意义分析如下:

1) 光斑等效高斯宽度一定时,随着盲元位置与光斑质心间相对距离的增大,盲元所在位置光强密度减小,使得由于盲元存在而缺失的光强信息减少,但在质心计算中作为加权系数的相对距离增大,因此盲元存在导致的质心偏移误差随着相对距离的增大会出现一个极大值。

2) 光斑等效高斯宽度增大导致光强密度降低,由于盲元存在而缺失的光强信息变少,因此盲元造成的附加质心偏移误差也减小。

以下是关于上述结论的仿真结果。

图2中 θ 表示盲元位置与光斑质心位置的相对方位角,定义为 $\cos\theta = \frac{x_{i_0} - x_p}{\rho_0}$, L 和 M 表示子孔径大小,下面的图中表示与此相同。

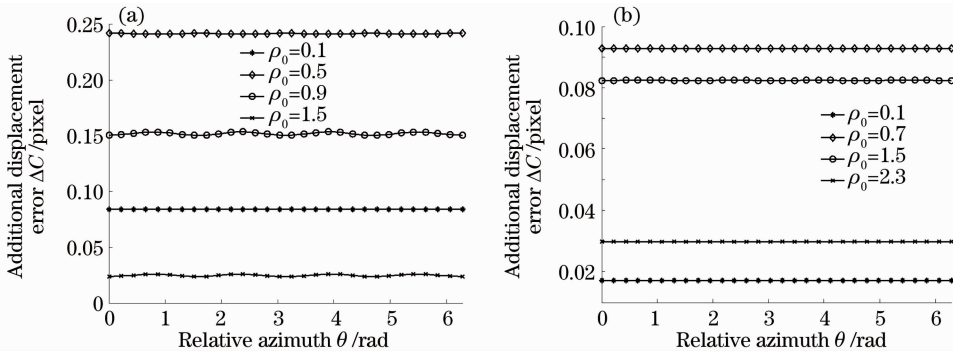


图2 相对距离不同时附加偏移误差与相对方位角的关系。(a)等效高斯宽度 $\sigma_A=0.5$,子孔径尺寸 $L \times M=11 \text{ pixel} \times 11 \text{ pixel}$; (b)等效高斯宽度 $\sigma_A=1.0$,子孔径尺寸 $L \times M=17 \text{ pixel} \times 17 \text{ pixel}$

Fig. 2 Additional displacement error changing with relative azimuth when relative distance is different. (a) Effective Gaussian width $\sigma_A=0.5$, size of subaperture $L \times M=11 \text{ pixel} \times 11 \text{ pixel}$; (b) effective Gaussian width $\sigma_A=1.0$, size of subaperture $L \times M=17 \text{ pixel} \times 17 \text{ pixel}$

由图2可以看出,在 $\sigma_A \geq 0.5$ 的情况下,可以认为 ΔC 完全由 ρ_0 决定,几乎不受 θ 影响,也说明对像元区域的圆形近似是合理的。

比较图3的不同曲线,可见 σ_A 较大时 ΔC 较小;而当 σ_A 一定时,随着 ρ_0 的增大 ΔC 先增大后减小,并且在某个 ρ_0 处存在 ΔC 的极大值点。

定义 ΔC 的极大值为 ΔC_{\max} ,对应 ΔC_{\max} 的 ρ_0 为 ρ_{\max} 。由(20)式可知 ρ_{\max} 由 σ_A 决定。由于(19)式中的积分难以得到解析表达式,无法通过函数求导的方式求出 ρ_{\max} ,因此采用拟合的方法进行计算,结果如图4所示。

由图4的拟合结果可见 $\rho_{\max} \approx \sigma_A$,也就是说,盲元位置与光斑质心位置的距离约等于光斑等效高斯宽度时,盲元引入的质心误差最大。

对应不同的 σ_A ,计算在 $\rho_0 = \sigma_A$ 时的附加偏移误差 ΔC_{\max} ,结果如图5所示。

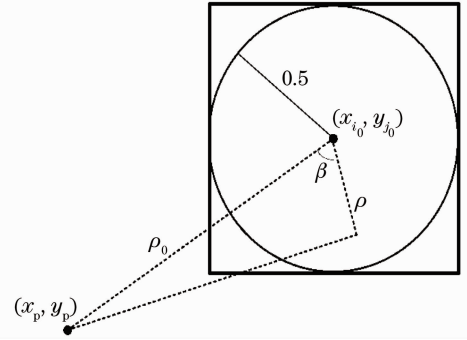


图1 像元区域的圆形表示示意图
Fig. 1 Sketch map of circular pixel area

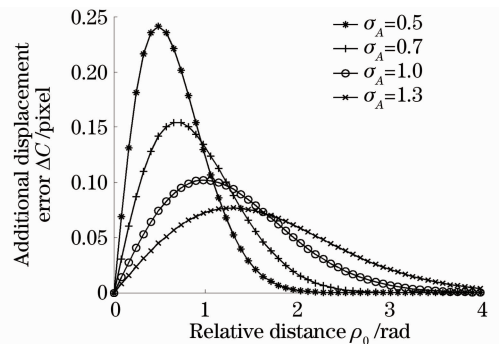


图3 等效高斯宽度不同时附加偏移误差与相对距离的关系

Fig. 3 Additional displacement error changing with relative distance when effective Gaussian width is different

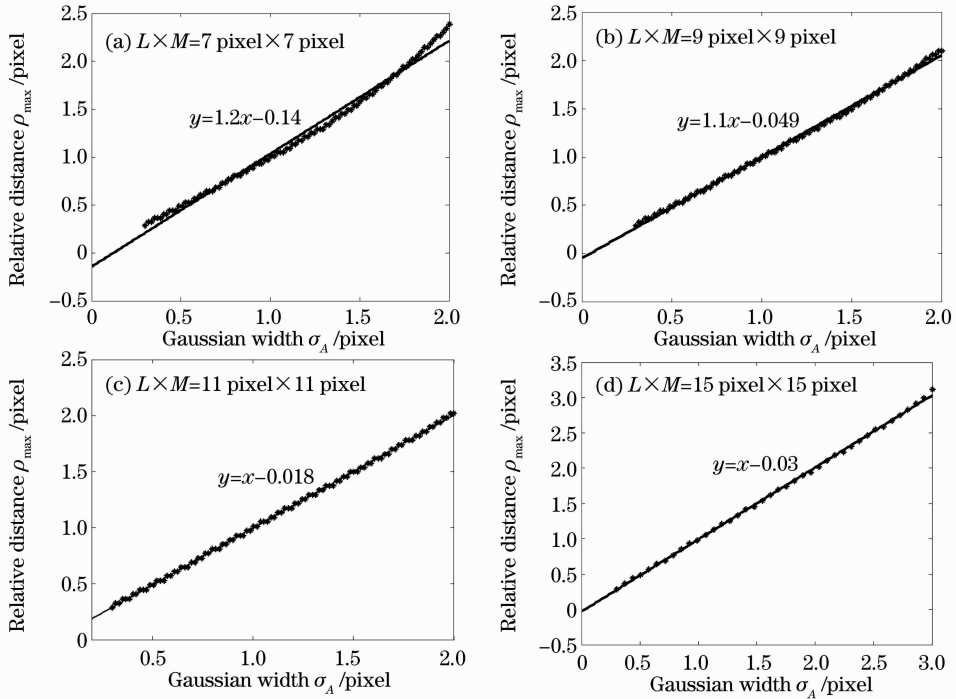


图4 高斯宽度与附加偏移误差达到最大值处的相对距离之间的拟合关系

Fig. 4 Curve fitting results of relation between Gaussian width and the relative distance when the additional displacement error reaches the maximum

由图5可见,当 $\sigma_A < 0.5$ 时, ΔC_{\max} 随 σ_A 增大急剧下降,在 $\sigma_A > 1$ 之后 $\Delta C_{\max} < 0.1$,这说明当光斑较大时,存在的单个盲元对质心误差的影响很小,可以忽略不计。

5 实验结果

实验装置如图6所示,点光源发出的光经过准直透镜后形成平行光束,经过倾斜镜反射后的平行光束被微透镜阵列分割,在CCD上聚焦形成光斑。当倾斜镜的倾斜角度发生变化时,光斑会在CCD上产生移动。部分实验参数如表1所示。

表1 部分实验参数

Table 1 Part of the experimental parameters

Parameter	Value
Size of subaperture / pixel	19×19
Focal length of micro-lens array / mm	7
Size of square micro-lens / mm	0.2×0.2
Size of pixel / μm	10.8×10.8
Wavelength of light / nm	780
Theoretical Gaussian width / pixel	0.89

利用哈特曼光斑点阵图像中四角没有光斑的部分来估计背景噪声源的均值和方差,计算得到背景噪声源均值 $\overline{N_B} = 72.2 \text{ ADU}$,起伏方差 $\sigma_B^2 = 14.8 \text{ ADU}$,将光斑图像减去最佳阈值 $\overline{N_B} + 3\sigma_B$ 后进行质心计算,近似认为此时的 (x_c, y_c) 即为真实质心 (x_p, y_p) 。

实验中采用的 CCD 靶面上并无盲元存在,根据光斑质心位置不同,假定子孔径内某个像元为盲元,从而

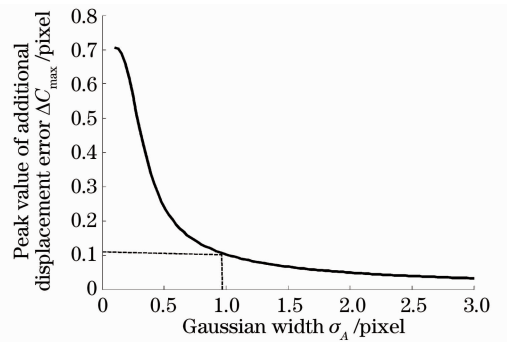


图5 附加偏移误差的峰值与光斑等效高斯宽度的关系

Fig. 5 Peak value of additional displacement error changing with effective Gaussian width of the spot

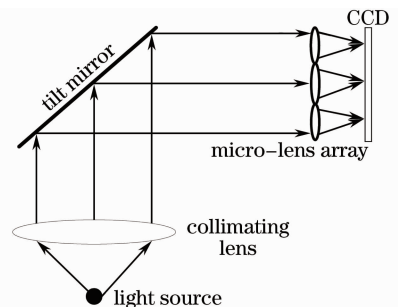


图6 实验装置示意图

Fig. 6 Sketch map of the experimental system

得到一系列盲元和光斑质心位置间相对距离 ρ_0 和对应的附加偏移误差 ΔC 。实验结果表明 ΔC 随相对距离 ρ_0 的增大而先增大后减小,并且在 $\rho_0 = \sigma_A$ 附近达到最大值,与仿真的结论相符合,如图 7 所示。

6 结 论

在对点源目标的探测中,光斑区域内存在的盲元会对哈特曼波前传感器的质心探测精度造成一定影响。本文详细推导了哈特曼波前传感器子孔径光斑区域内存在单个盲元条件下各类误差源造成的质心探测误差的表达式,指出盲元引入的误差主要是由于光强信息的缺失而导致的质心偏移误差,该误差由光斑等效高斯宽度和盲元位置与光斑真实质心之间的相对距离两个因素决定,并且在相对距离等于高斯宽度处附近达到最大值。

致谢 感谢中国科学院自适应光学重点实验室的姜文汉院士和李新阳研究员对本文工作的指导,同时感谢杨金生博士和马晓焯博士在理论推导和实验上提供的帮助。

参 考 文 献

- Jiang Wenhan, Xian Hao, Yang Zeping *et al.*. Applications of Shack-Hartmann wavefront sensor[J]. *Chinese J. Quantum Electronics*, 1998, **15**(2): 228~235
姜文汉, 鲜浩, 杨泽平等. 哈特曼波前传感器的应用[J]. 量子电子学报, 1998, **15**(2): 228~235
- Zhou Renzhong. Adaptive Optics[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1996. 121~138
周仁忠. 自适应光学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996. 121~138
- Yang Jinsheng, Rao Xuejun, Rao Changhui. A corneal topography based on Hartmann-Shack sensor[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 826~831
杨金生, 饶学军, 饶长辉. 基于哈特曼夏克传感器的角膜地形图测量仪[J]. 中国激光, 2010, **37**(3): 826~831
- Xu Hongyan, Xian Hao, Zhang Yudong. Algorithm for reconstructing the whole-aperture wavefront from annular subaperture Hartmann-Shack gradient data[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(1): 0112005
徐洪艳, 鲜浩, 张雨东. 利用环形子孔径哈特曼夏克斜率数据复原全孔径波前相位算法研究[J]. 光学学报, 2010, **31**(1): 0112005
- Xu Ancheng, Chen Jiabi, Zhang Peiming. Error analysis of ocular aberration measurement instrument based on Hartmann-Shack wavefront sensor[J]. *Laser & Opto-Electronics Progress*, 2010, **47**(8): 082801
徐安成, 陈家璧, 张培茗. 基于哈特曼夏克传感器的人眼像差测量仪误差分析[J]. 激光与光电子学进展, 2010, **47**(8): 082801
- Genrui Cao, Xin Yu. Accuracy analysis of a Hartmann-Shack wavefront sensor operated with a faint object[J]. *Opt. Engng.*, 1994, **33**(7): 2331~2335
- Jiang Wenhan, Xian Hao, Shen Feng. Detecting error of Shack-Hartmann wavefront sensor[J]. *Chinese J. Quantum Electronics*, 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
- Xiaoyu Ma, Changhui Rao, Hanqing Zheng. Error analysis of CCD-based point source centroid computation under the background light[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(10): 8525~8541
- State Bureau of Quality and Technical Supervision. GB/T 17444-1998. The Technical Norms for Measurement and Test of Characteristic Parameters of Infrared Focal Plane Arrays[S]. Beijing: China Standard Press, 1998
国家质量技术监督局. GB/T 17444-1998. 红外焦平面阵列特性参数测试结束规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 1998
- Zhou Zhicheng. On the subject of Gauss approximation of Poisson distribution[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 1988, **24**(5): 605~619
周志成. 关于泊松分布的高斯近似问题[J]. 北京大学学报(自然科学版), 1988, **24**(5): 605~619
- Ma Xiaoyu, Zheng Hanqing, Rao Changhui. Optimal spot centroid position during Shack-Hartmann wavefront sensor calibration in adaptive optics system[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, **36**(4): 22~26
马晓焯, 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

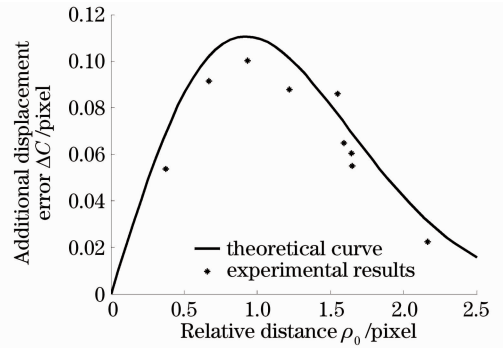


图 7 附加偏移误差与相对距离关系的理论结果与实验结果比较

Fig. 7 Experimental and theoretical results of the additional displacement error changing with relative distance