

扩大人眼波前像差仪测量范围方法的研究*

高卫华 王肇圻** 吴晓明 母国光

(南开大学、天津大学联合研究院,南开大学现代光学研究所,光电信息技术科学教育部重点实验室,天津 300071)

摘 要 提出了一种扩大人眼波前像差仪测量范围的方法,该法综合了波前重建展开算法和波前探测的模板技术,大幅度扩大了波前测量范围.在待测波前像差超出展开算法测量范围的情况下,此方法仍能对像差正常测量.与模板技术相比,该法大幅扩大了可测的曲率范围.以球面波前入射的实验数据表明,所提出的新方法所能测量的最小曲率半径由模板法的 75 mm 降低到 10 mm,并且由于本方法突破了展开算法的极限,实际上对局部曲率更高的波前仍可测量.

关键词 人眼波前像差;展开算法;模板技术

中图分类号 O435.2 **文献标识码** A

0 引言

Hartmann-Shack 波前传感器是目前常用的测量人眼波前像差的工具^[1~3].如果待测人眼像差过大,会导致某些子孔径光斑偏离出对应的子孔径,引起测量误差.这种情况在对严重屈光不正和做过角膜,晶状体手术的患者的测量过程中很常见,因此扩大波前像差仪的测量范围显得十分必要.

传感器的测量范围一般来说是由质心探测算法决定的.每个光斑都会被限定在一个由算法划定的子孔径之内,为了避免探测误差,待测波前的斜率和曲率必须足够小以使光斑不会溢出对应的子孔径^[4,5].如果波前起伏变化过于陡峭,就会有光斑溢出出现,这时就需要通过特殊的技术扩大传感器的探测范围来解决.

一种方法是在透镜阵列和 CCD 之间添加辅助平面,通过测量该平面上光斑分布来实现准确波前恢复,扩大测量范围^[6];在文献^[5]中还提到了另一个方法,利用展开算法来扩大 H-S 的测量范围,但是这种方法能测量的曲率范围相对有限,并且无法处理光斑重叠问题^[7];Hamam 用空间光调制器构造掩模也同样可以扩大测量范围^[8],但他所设计的模板扩展的范围较有限,经实验证明,如果采用设计的模板可将测量范围大幅度提高,但相应地测量次数和时间也会增加,不利于人眼的动态测量^[9].

本文在综合研究展开算法和掩模技术的基础上,尝试将二者结合起来扩大 H-S 系统的测量范围.经实验数据证明,这种方法在展开算法应用的极限情况下仍能正常测量,并大幅提高了模板法所能测

量的曲率范围.最后,对这几种扩大 H-S 系统测量范围的方法进行了综合比较.

1 方法

H-S 波前传感器原理如图 1, H-S 系统通过微透镜阵列采样测量波前.被测波前被透镜阵列分割

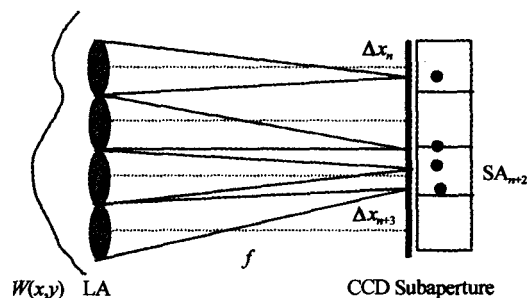


图 1 哈特曼传感器原理

Fig. 1 Principle of the Hartmann-Shack sensor

成多个子孔径,每个子孔径在焦平面上形成一个子孔径光斑.相对于参考点,每个光斑有偏移量(Δx , Δy),波前梯度 $\nabla W(x, y)$ 可表示为

$$\{\nabla W(x, y)\}_{i,j} = \frac{1}{f} \left\{ \begin{matrix} \Delta x \\ \Delta y \end{matrix} \right\}_{i,j} \quad (1)$$

其中 f 是微透镜阵列的焦距, i, j 表示每一个透镜元, W 表示待测波前.波前梯度在子孔径两个正交方向的偏导值,即为波前斜率.根据子孔径上的波前斜率进行波前复原计算,就可得到整个孔径的波前像差.常用的波前复原算法有模式法和区域法等^[10,11].

本文提出的扩展 H-S 系统测量范围的方法可分三步进行.首先,通过掩模测量波前得到 4 幅分立的光斑点阵图像,分离重叠的光斑;其次,利用展开算法对每幅图像进行分别计算,去除光斑的不连续性,使得偏离光斑与参考点一一对应;最后,将四幅图像整合,得到每个子孔径的波前斜率,重构波前.为简明起见,下文仅对一维问题进行分析.

*教育部南开大学、天津大学合作基金项目 and 天津市科技攻关重点项目 (No. 033183711) 资助

** Tel: 022-23507206 Email: wangzq@nankai.edu.cn

收稿日期: 2004-05-08

1.1 掩模测量

图 2 为实验中应用的掩模. 该掩模共有四种子模式, 分别为图 2、图 2 图案整体水平右移、再垂直下移、最后水平左平移一个子孔径长度, 得到的四幅图样. 一次完备的波前测量由此四种子模式在极短的时间内交替测量完成^[6]. 图 3(a)、图 3 (b) 分别为使用模板技术前后得到的两幅光斑点阵图样, 可以看出, 使用模板技术后得到的子孔径间距是未经模板测量的子孔径间距的 2 倍.

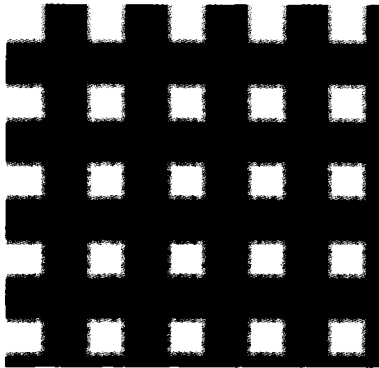
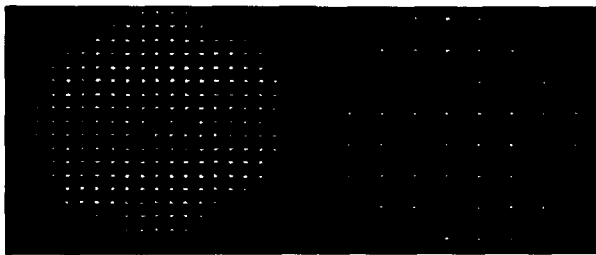


图 2 具有四种子模式的模板
Fig. 2 Mask with four sub-patterns



(a) Without mask technique (b) With mask technique

图 3 光斑点阵
Fig. 3 Spots array

$$p' = 2p \tag{2}$$

p 和 p' 分别表示使用模板前后对应的子孔径间距. 由式^[6]

$$\{W(x)_{i,j}\}_{\max} = \{W(y)_{i,j}\}_{\max} = \frac{p^2}{2f} \tag{3}$$

知, 经掩模测量后, 子孔径内可测最大波前像差提高为原来的 4 倍.

1.2 展开算法

展开算法曾广泛应用于干涉仪法测量波前像差, 近年来经过改进应用用在 H-S 测量系统中^[7]. 在应用展开算法时, 首先要确定一个只包含一个对应光斑的子孔径(u)作为起始点; 然后, 定义一个与每个子孔径一一对应的整数 $N_{i,s}$ 来描述光斑分布的连续性, 其中 i 表示列数, s 表示如果一个子孔径包含多个光斑时, 每个光斑在该孔径内的序列数. 对于选定的起始孔径 u 来说, 它的 $N_{u,i} = 0$.

那么, 就可按照如下的步骤使用展开算法进行计算. 首先, 计算相邻的两子孔径光斑的偏移量差

$$\Delta\sigma_{i,s} = \sigma_{i,s} - \sigma_{(i\pm 1),s} \tag{4}$$

将得到的结果带入下式, 求出子孔径对应的 $N_{i,s}$.

$$N_{i,s} = \begin{cases} N_{(i\pm 1),s} & -\frac{p}{2} \leq \Delta\sigma_{i,s} \leq \frac{p}{2} \\ N_{(i\pm 1),s} - \text{sign}(\Delta\sigma_{i,s}) & \text{else} \end{cases} \tag{5}$$

最后求出每个光斑对应的参考点的位置, 以及实际偏移量, 将光斑和子孔径一一对应起来

$$\Delta X_{i,s} = \Delta x_{i,s} + N_{i,s} \times p \tag{6}$$

$$R_{i,s} = r_{i,s} - N_{i,s} \times p \tag{7}$$

式中, $\Delta X_{i,s}$ 和 $\Delta x_{i,s}$ 分别表示光斑实际和虚拟的偏移量; $R_{i,s}$ 和 $r_{i,s}$ 分别表示每个光斑对应的实际和虚拟的参考点的位置.

但是这个算法所能计算的波前曲率有限, 要求两个相邻子孔径内光斑的偏移量之差的绝对值不能大于两子孔径间距的一半.

$$\left| \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)_{i,j} - \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)_{i\pm 1,j} \right| < \frac{p}{2f} \tag{8}$$

1.3 实例

本文以模拟波前为例进行说明. 图 4(a) 为一幅波面变化幅度较大的波前经微透镜阵列采样后得到的光斑图样, 从中可以看出部分光斑移出了对应的子孔径, 并出现光斑重叠现象. 通过比较几个相邻光斑的实际偏移量发现, 微透镜 L_5, L_6, L_7 等对应的多个光斑偏移量差值都超过了相邻子孔径间距的一半, 使用展开算法无法计算. 图 4(b) 示出了不用掩模技术情况下的光斑偏移. 利用模板技术, 可将每个子孔径的测量范围扩大为原来的 2 倍, 并将重叠的光斑分开. 图 4(c) 显示在一种模板子模式

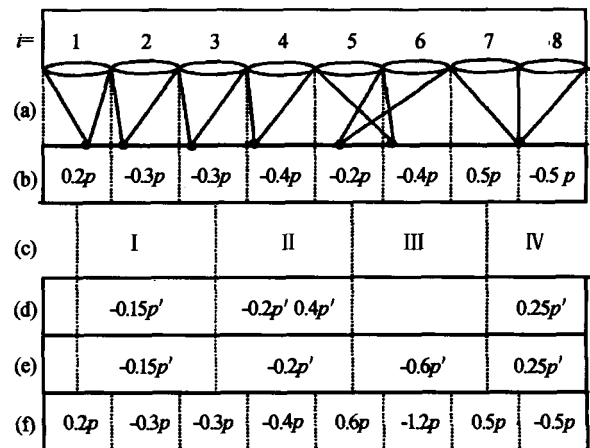


图 4 (a) 与波前平均斜率对应的点位移; (b) 不同掩模技术下的点位移 Δx ; (c) 有掩模的子孔径分布; (d) 有掩模的点位移 Δx ; (e) 无掩模未重叠的点位移 ΔX ; (f) 与全部透镜阵列对应的未重叠 ΔX

Fig. 4 (a) Mean wave slopes translated into lateral spot dislocations; (b) Spots dislocation Δx without mask; (c) Subapertures distribution with mask; (d) Δx with mask; (e) Unwrapped ΔX with mask; (f) Unwrapped ΔX corresponding with all lenses

下得到的新子孔径分布: $S_I, S_{II}, S_{III}, S_{IV}$, 分别对应微透镜 L_2, L_4, L_6, L_8 ; 可以看出由于待测波前波面像差过大, 使得 S_{II} 子孔径内仍包含了 2 个孔径光斑, 超出了模板技术的测量范围.

$$|\Delta X_{6,1} - \Delta X_{5,1}| = 1.8p > 0.5p \quad (9)$$

$$|\Delta X_{7,1} - \Delta X_{6,1}| = 1.7p \quad (10)$$

对于这种像差过大的波前, 只有使用本文提到的方法才能解决. 按照展开算法的步骤, 从模板光斑图中找出光斑偏移量, 如图 4(d).

$$\begin{cases} \Delta x_{I,1} = -0.15p' \\ \Delta x_{II,1} = -0.2p' \\ \Delta x_{II,2} = 0.4p' \\ \Delta x_{IV,1} = 0.25p' \end{cases} \quad (11)$$

对应的整数 N

$$\begin{cases} N_{I,1} = 0 \\ N_{II,1} = 0 \\ N_{II,2} = -1 \\ N_{IV,1} = 0 \end{cases} \quad (12)$$

计算出光斑实际的偏移量和参考点的位置, 见图 4(e).

$$\begin{cases} \Delta X_{I,1} = -0.15p' \\ \Delta X_{II,1} = -0.2p' \\ \Delta X_{II,2} = -0.6p' \\ \Delta X_{IV,1} = -0.25p' \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} R_{I,1} = r_{I,1} \\ R_{II,1} = r_{II,1} \\ R_{II,2} = r_{II,1} + p' \\ R_{IV,1} = r_{IV,1} \end{cases} \quad (14)$$

将光斑与子孔径正确的对应起来.

将其它模板子模式得到的结果组合起来, 就得到了整个透镜阵列对应的完整的光斑偏移量, 如图 4(f). 求出波前斜率, 利用波前恢复算法就可得到整体的波前像差. 通常情况下, 以球面波前入射为例, 对于微透镜阵列焦距 $f = 5 \text{ mm}$, 子孔径间距 $p = 0.2 \text{ mm}$ 的 H-S 系统, 所能测量的最小曲率半径为 $\rho_{\min} = 150 \text{ mm}$, 对应的峰谷值 $PV = 47.4 \lambda$ (假设波面半径为 3 mm , 波长 633 nm , 下同); 利用文中所示模板测量后, 能测的 $\rho_{\min} = 75 \text{ mm}$, 峰谷值 $PV = 94.7 \lambda$; 使用本文的方法后, 系统能够测量的最小曲率半径可达到 $\rho_{\min} = 10 \text{ mm}$, $PV = 729 \lambda$, 并且由于该法突破了展开算法的极限, 实际上对局部曲率更高的波前仍可以测量.

2 结论

本文提出了一种扩大 Hartmann-Shack 波前测量范围的方法, 该方法结合了展开算法和模板技术

这两种方法的特点, 进一步扩大了测量范围, 实现了对大像差人眼的准确测量. 通过实验数据证明, 在待测波前像差超出展开算法测量范围的情况下, 此方法仍能对像差正常测量; 同时与模板技术相比, 该法大幅提高了可测的波前曲率范围.

参考文献

- 1 赵秋玲, 王肇圻, 张春书. 非球面和梯度折射率在眼光学成像中的作用. 光子学报, 2002, 31(11): 1409~1412
Zhao Q L, Wang Z Q, Zhang S C. *Acta Photonica Sinica*, 2002, 31(11): 1409~1412
- 2 赵秋玲, 王肇圻, 全薇, 等. 用于复色哈特曼人眼波像差测量的折/衍射混合调焦系统. 光子学报, 2004, 33(3): 342~345
Zhao Q L, Wang Z Q, Quan W, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(3): 342~345
- 3 全薇, 王肇圻, 宋贵才, 等. 用 SVGAI 薄膜晶体管液晶显示器矫正人眼波像差. 光子学报, 2004, 33(12): 1445~1448
Quan W, Wang Z Q, Song G C, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(12): 1445~1448
- 4 Liang Junzhong, Williams D R. Aberrations and retina image quality of the normal human eye. *J Opt Soc Am A*, 1997, 14(11): 2873~2882
- 5 Esther M B, Navarro R. Laser Ray-Tracing versus Hartmann-Shack sensor for measuring optical aberrations in the human eye. *J Opt Soc Am A*, 2000, 17(6): 974~985
- 6 Bruno T L, Wirth A, Jankevics A J. Applying Hartmann wavefront-sensing technology to precision optical testing of the HST correctors. in: Ealey M A, eds. *Active and Adaptive Optical Components and Systems II*, 1993. *Proc SPIE*, 1920. 328~336
- 7 Pfund J, Lindlein N, Schwider J. Dynamic range expansion of a Shack-Hartmann sensor by use of a modified unwrapping algorithm. *Optical Letters*, 1998, 23(13): 995~997
- 8 Hamam H. A direct technique for calculating the profile of aberration of the eye measured by a modified Hartmann-Shack apparatus. *Optics Communications*, 2000, 173(1-6): 23~36
- 9 高卫华, 王肇圻, 郭欢庆, 等. 掩模测量人眼波前像差技术研究. 光电子·激光, 2004, 15(11): 1361~1364
Gao W H, Wang Z Q, Guo H Q, et al. *J Optoelectro Laser*, 2004, 15(11): 1361~1364
- 10 Southwell W H. Wavefront estimation from wavefront slope measurement. *J Opt Soc Am (A)*, 1980, 70(8): 998~1006
- 10 Lane R G, Tallon M. Wavefront reconstruction using a Shack-Hartmann sensor. *Appl Opt*, 1992, 31(32): 6902~6908

A Method to Expand the Dynamic Range of a Hartmann-Shack Sensor Deduced from the Unwrapping Algorithm and the Mask Technique

Gao Weihua, Wang Zhaoqi, Wu Xiaoming, Mu Guoguang

*United Academy of Nankai University and Tianjin University Institute of Modern Optics, Nankai University The Key
Laboratory of Opto-electronic Information Science and Technique, Ministry of Education, Tianjin 300071*

Received date: 2005-05-08

Abstract A method of expanding the dynamic range of a Hartmann-Shack (H-S) sensor for measuring the eye's aberration is proposed. It is a combination of unwrapping algorithm and mask technique, which greatly increases the dynamic range of H-S system. The experimental data shows that it performs well even in the case where the unwrapping method is limited. It also shows that the measurable maximum curvature can be greatly improved compared with the mask technique. When a spherical wavefront incidents, the measurable minimum curvature radius can be reduced from 75 mm to 10 mm by this method, compared with the the mask technique. Actually since it overcomes the limitation of unwrapping algorithm, much higher local curvature can still be measured.

Keywords Wavefront aberration; Unwrapping algorithm; Mask technique

Gao Weihua was born in Hebei Province in 1977, received his B. S. degree from Hebei University in 1999. At present, he is pursuing his M. S. in the Institute of Modern Optics, Nankai University. His interest fields are assessment and correction of ocular aberrations and the general application of advanced optical techniques to vision-related problems.

