

光栅衍射法测量微透镜阵列焦距时产生的光斑干扰分析

朱咸昌 伍 凡 曹学东 吴时彬 张 鹏

(中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209)

摘要 基于光栅衍射的转角法无需转动光管,与传统的转角法相比具有较高的测量效率。而微透镜阵列元件子单元数众多,利用该方法进行测量时,光栅的各级衍射斑可能发生干扰,影响测量精度甚至无法进行测量。利用 Matlab 软件模拟分析测量过程中子单元光栅 0 级和 ± 1 级衍射光斑间的干扰,通过分析测量光源波长、光栅周期、微透镜阵列的子孔径和焦距,选取合理的测量光源和光栅避免干扰,从而完成对微透镜阵列焦距的测量。测量结果表明,该方法具有较高的测量精度和测量效率,可用于单元数较多、 F 数较小的微透镜阵列焦距测量。

关键词 光栅衍射;微透镜阵列;焦距测量;转角法

中图分类号 O436.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.1112010

Analysis of Focus Dislocation Induced by the Microlens Array Measuring Based on Grating Diffraction

Zhu Xianchang Wu Fan Cao Xuedong Wu Shibin Zhang Peng

(Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China)

Abstract Compared with the traditional rotational method, a method for the focal length measurement of microlens array based on grating diffraction has a higher efficiency, because this method need not rotate the collimator. As microlens array has a large number of cells generally, the disturbance diffracted from nearby cells also needs analysis. The interferences between 0-order and ± 1 -order diffracted foci of grating are analyzed by Matlab. The proper wavelength and grating can be determined for different kinds of microlens array by analyzing the wavelength, grating period, sub-aperture and focal length of microlens array. The disturbance can be avoided and the focal length measuring of microlens array can be finished. The experimental results show that this method is fit for the testing of microlens array with small F -number and many cells because of its high precision and efficiency.

Key words diffraction grating; microlens array; focal-length measurement; rotation method

OCIS codes 050.1950; 100.2960; 230.6120; 260.1960

1 引 言

微光学迅速发展的一个重要标志就是阵列光学元件的出现。微透镜阵列作为阵列衍射光学元件的重要器件^[1~3],由于其自身衍射效率高、工作波段宽等优点而在波前传感、光聚能和光整形等光学系统中得到广泛应用^[4~6]。由于制作工艺的成熟,微透镜阵列朝着微型化、多单元数的方向发展^[5,6]。对微透镜阵列焦距这一重要性能参数的测量不仅需要较高的测量精度,同时需要较高的测量效率。传统

的检测方法例如干涉仪测量法、显微镜测量法、矢高口径理论计算法、浮雕深度计算法以及光强测量法不能满足大单元数的微透镜阵列焦距测量^[7~19]。与传统的转角法测量相比,基于光栅衍射的转角法测量微透镜阵列焦距无需转动光管,因此具有较高的测量效率,适合阵列数较多、焦距较短的微透镜阵列测量^[20]。但对于不同的微透镜阵列,利用光栅衍射转角法测量需要选取合适的光源和光栅以避免衍射光斑发生干扰。针对这一状况,本文结合 Matlab

收稿日期: 2011-06-18; **收到修改稿日期**: 2011-07-10

作者简介: 朱咸昌(1987—),男,博士研究生,主要从事测试计量技术与仪器等方面的研究。

E-mail: zhuxianchang@126.com

导师简介: 伍 凡(1957—),男,研究员,博士生导师,主要从事先进光学制造和检测技术等方面的研究。

E-mail: wufan@ioe.ac.cn

软件处理技术,模拟分析光源波长和光栅周期对微透镜阵列测量的影响,同时选取合适的系统参数,完成对微透镜阵列的测量。

2 测量原理

根据傅里叶光学原理,入射平行光经过光栅调制后其振幅和相位发生相关的改变,调制光经过微透镜阵列的相位变换在 CCD 相机上形成相应的菲涅耳衍射图像。图 1 为光路示意图。

平行光通过光栅时,光栅出射光强分布由光栅衍射因子和干涉因子确定。相应的坐标设定为: x 轴垂直于光栅刻线方向, y 轴沿光栅刻线方向, z 轴沿光轴方向;光栅面、微透镜阵列面和像面对于坐标系标定为 $x-y-z, x_1-y_1-z_1, x_f-y_f-z_f$ 。

设光栅周期为 d ,则龙基光栅的复振幅透射率^[19]为

$$g(x) = \sum c_n \exp\left(j2\pi \frac{n}{d}x\right), \quad n = 0, \pm 1, \pm 2 \dots \quad (1)$$

由于龙基光栅 ± 2 级衍射光缺级,高级次衍射光强很小可忽略,只考虑 0 级和 ± 1 级衍射光在光

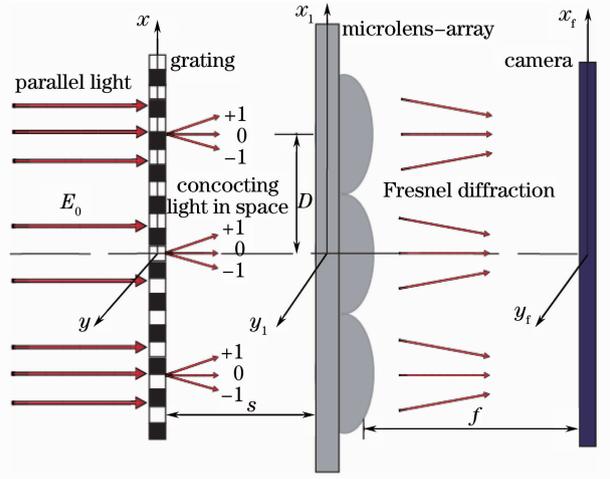


图 1 测量光路示意图

Fig. 1 Schematic of the light path for measurement

$$U(x, y) = E_0 c_0 + E_0 c_1 \exp\left(j2\pi \frac{x}{d}\right) + E_0 c_1 \exp\left(-j2\pi \frac{x}{d}\right). \quad (2)$$

对于图 1 中位于中心的子透镜单元,光栅衍射光经透镜出射后相位发生变化,微透镜后表面出射光复振幅为

$$U(x_1, y_1) = E_0 c_0 \exp\left(-k \frac{x_1^2 + y_1^2}{2f}\right) + E_0 c_1 \exp\left(j2\pi \frac{x_1}{d}\right) \exp\left(-k \frac{x_1^2 + y_1^2}{2f}\right) + E_0 c_1 \exp\left(-j2\pi \frac{x_1}{d}\right) \exp\left(-k \frac{x_1^2 + y_1^2}{2f}\right). \quad (3)$$

微透镜阵列后表面到 CCD 焦面为菲涅耳衍射区,根据标量衍射理论,CCD 焦面接收到的菲涅耳衍射像的复振幅为

$$U(x_f, y_f) = \iint_S \left\{ E_0 c_0 \exp\left(-jk \frac{x_f x_1 + y_f y_1}{f}\right) + E_0 c_1 \exp\left[-jk \frac{[x_f - f(\lambda/d)]x_1 + y_f y_1}{f}\right] + E_0 c_1 \exp\left[-jk \frac{[x_f + f(\lambda/d)]x_1 + y_f y_1}{f}\right] \right\} dx_1 dy_1, \quad (4)$$

式中 S 为微透镜阵列的子单元所覆盖的面积。从像面上的复振幅分布可看出:CCD 接收到 3 个(0 级、+1 级、-1 级)相似的衍射像,仅存在位置和光强上的差异,其中 0 级光的衍射像复振幅为

$$U_0(x_f, y_f) = E_0 c_0 \pi D^2 \frac{J_1\left(\frac{D}{2}k\theta_0\right)}{Dk\theta_0}. \quad (5)$$

显然(5)式为一阶第一类贝塞尔函数,一阶贝塞尔函数在 $Dk\theta_0/2 = 0$ 时 $J_1(0)$ 有极大值(主极大);而 $Dk\theta_0/2 = 1.22\pi$ 时, $J_1(1.22\pi) = 0$ 为第一个极小值位置,且绝大部分能量集中在这一区域(艾里斑)^[21,22]。

通过同样的分析可得到光栅的 ± 1 级光的衍射像,其像点方向与光轴夹角满足

$$\begin{cases} \frac{x_f \pm f \frac{\lambda}{d}}{f} = \frac{r_f \cos \psi_f}{f} = \theta_{\pm 1} \cos \psi_f \\ \frac{y_f}{f} = \frac{r_f \sin \psi_f}{f} = \theta_{\pm 1} \sin \psi_f \end{cases}. \quad (6)$$

+1 级衍射像中心位置为 $(f\lambda/d, 0)$; -1 级衍射像中心位置为 $(-f\lambda/d, 0)$,角半径均与 0 级衍射像相同。

根据分析可知,每个微透镜阵列子单元经过衍射在其焦面上形成 3 个复振幅符合贝塞尔函数分布的光斑。通过测量各个衍射光斑的中心距,即可完

成对微透镜阵列的焦距测量。

由于光栅衍射 0 级和 1 级衍射光强差异较大,其相对强度主要由光栅的占空比确定^[22],龙基光栅的占空比为 50%,1 级衍射光相对 0 级衍射光的强度为

$$\frac{c_1}{c_0} = \left[\frac{\sin(\pi d \sin \theta / 2\lambda)}{\pi d \sin \theta / 2\lambda} \right]^2 = \left(\frac{\sin \pi/2}{\pi/2} \right)^2 \approx 0.4. \quad (7)$$

测量 0 级和 1 级光斑中心距易引起较大误差,而 +1 级和 -1 级光斑强度一致。利用 CCD 检测出 +1 级和 -1 级衍射光斑的中心距 h ,与微透镜阵列相应子单元的焦距满足

$$h = 2f \frac{\lambda}{d}. \quad (8)$$

因此,通过波长和光栅周期值可计算出微透镜阵列焦距。

3 衍射光斑干扰分析

利用光栅衍射的转角法测量微透镜阵列焦距时,由于微透镜阵列子单元口径较小,各级衍射光斑之间可能会形成干涉影响测量,因此需要在测量前对可能产生的干扰进行分析。分析依据为物理光学系统分辨标准即瑞利判据^[21]:一个点物衍射像的中央主极大与相邻另一个衍射像的第一个极小重合,此时系统恰好可以分辨两个点物。

根据测量原理,衍射光斑的位置由微透镜阵列焦距、口径、测量光源波长和光栅周期确定。对具体的微透镜阵列(焦距和口径确定)利用 Matlab 软件进行模拟,软件的用户界面如图 2 所示。

对于不同规格的微透镜阵列,利用该方法可以确定测量波长和光栅周期对光斑干扰的影响。该方

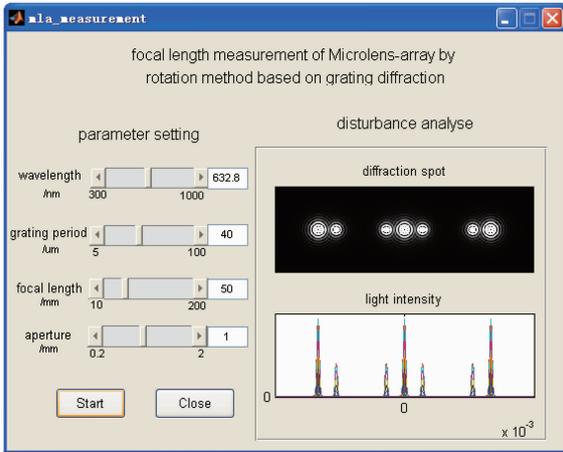


图 2 Matlab 编制的干扰分析计算用户界面

Fig. 2 Interface for disturbance simulation in Matlab

法测量微透镜阵列干扰主要包括相邻子孔径 0 级衍射光斑间的干扰、0 级光斑和 1 级光斑间的干扰、±1 级衍射光斑间的干扰。第一种干扰需要在制作加工微透镜阵列时进行控制^[23],制作完成的微透镜阵列 0 级衍射光斑不会发生干扰;而通常 0 级光斑和自身透镜 1 级衍射光斑不会发生干扰,所以主要分析 0 级光斑和相邻子透镜的 1 级光斑间的干扰及 ±1 级衍射光斑间的干扰。

3.1 波长变化对光斑干扰的影响

根据测量原理分析,图 1 中微透镜阵列中央子透镜 0 级衍射光的艾里斑满足

$$\begin{cases} \text{position,} & (0,0) \\ \text{radius,} & r_0 = 1.22\lambda \frac{f}{D} \end{cases} \quad (9)$$

微透镜阵列上方子透镜 -1 级衍射光的艾里斑为

$$\begin{cases} \text{position,} & \left(D - f \frac{\lambda}{d}, 0\right) \\ \text{radius,} & r_{-1} = 1.22\lambda \frac{f}{D} \end{cases} \quad (10)$$

当中央子透镜的 0 级光衍射像的第一个极小和上方子透镜的 -1 级光的衍射像的主极大重合,即认为二者发生干扰不能进行测量,此时有

$$\pm 1.22\lambda \frac{f}{D} = D - f \frac{\lambda}{d}. \quad (11)$$

微透镜阵列中央子透镜的 +1 级光的艾里斑为

$$\begin{cases} \text{position} & \left(f \frac{\lambda}{d}, 0\right) \\ \text{radius} & r_{+1} = 1.22\lambda \frac{f}{D} \end{cases} \quad (12)$$

显然,当微透镜阵列中央子透镜 +1 级衍射光斑和上方子透镜 -1 级衍射光斑发生干扰时应满足

$$\begin{cases} 1.22\lambda \frac{f}{D} + f \frac{\lambda}{d} = D - f \frac{\lambda}{d} \\ f \frac{\lambda}{d} = D - f \frac{\lambda}{d} + 1.22\lambda \frac{f}{D} \end{cases} \quad (13)$$

以焦距为 20 mm,口径为 0.4 mm 的微透镜阵列为例,设定光栅周期为 40 μm,由(11)式和(13)式分析波长范围为 100~1000 nm 时其光斑干扰,结果如表 1 所示。

选取波长分别为 400, 632.8 和 740 nm,利用 Matlab 分析光斑干扰情况,如图 3 所示。分析表明,在波长较短的状态下光斑没有干扰;逐渐增加波长,±1 级光斑发生干扰,然后分离到没有干扰的状态,再发生 1 级衍射光斑与相邻子孔径的 0 级衍射光斑的干扰。

表 1 波长引起的光斑干扰

Table 1 Disturbance influenced by wavelength

Wavelength /nm	100~377	377~426	426~713	713~742	742~1000
Disturbance	No	±1-orders	No	0/1-orders	No

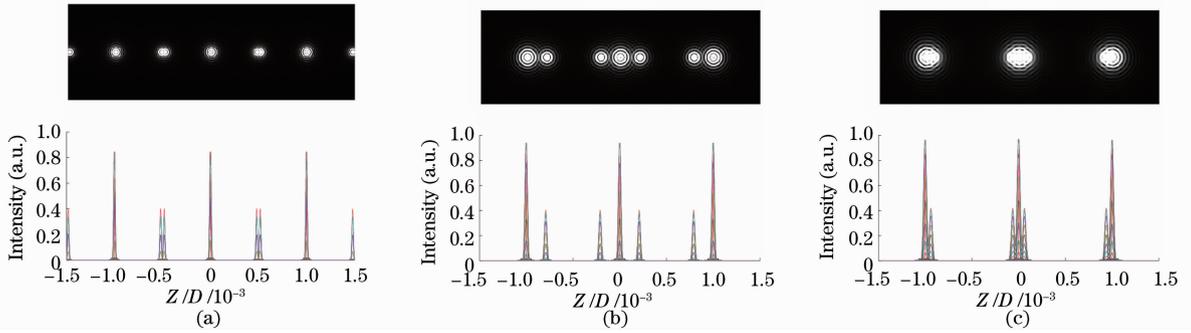


图 3 不同波长产生的光斑干扰。(a) 400 nm 时±1 级光斑发生干扰;(b) 632.8 nm 时无干扰;
(c) 740 nm 时 0 级和 1 级光斑间的干扰

Fig. 3 Spot disturbance induced by different wavelengths. (a) ±1-order spot disturbance at 400 nm; (b) no disturbance at 632.8 nm; (c) 0/1-order spot disturbance at 740 nm

3.2 光栅周期对光斑干扰的影响

设定光源波长为 632.8 nm,由(11)式和(13)式分析焦距为 20 mm,口径为 0.4 mm 的微透镜阵列在光栅周期范围为 10~100 μm 时的衍射光斑干扰

情况,结果如表 2 所示。

选取周期为 30,40 和 60 μm 的光栅进行模拟分析,光斑干扰状况如图 4 所示。

表 2 光栅周期引起的光斑干扰

Table 2 Spot disturbance induced by grating period

Grating period /μm	10~29	29~35	35~58	58~70	70~100
Disturbance	No	0/1-orders	No	±1-orders	No

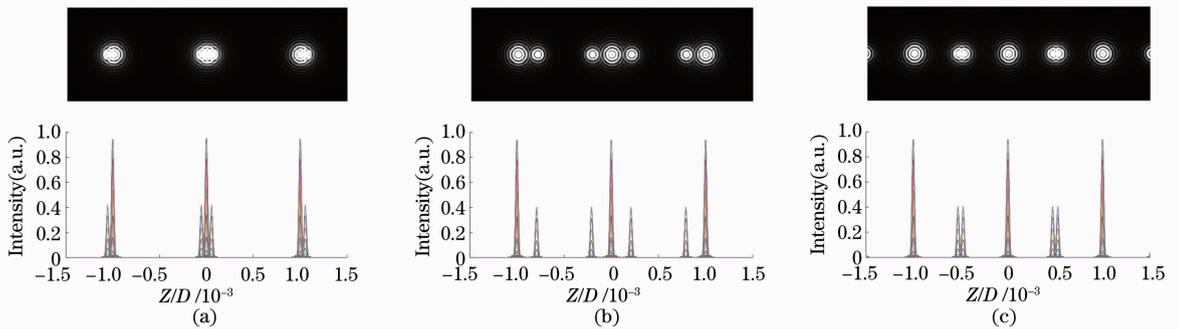


图 4 不同光栅周期产生的光斑干扰。(a) 周期为 30 μm 时 0 级和 1 级光斑的干扰;(b) 周期为 40 μm 时无干扰;
(c) 周期为 60 μm 时±1 级光斑间的干扰

Fig. 4 Spot disturbance engendered by different grating periods. (a) 0/1-order spot disturbance with 30 μm period;
(b) no disturbance with 40 μm period; (c) ±1-order spot disturbance with 60 μm period

上述分析表明:对于不同口径和焦距的微透镜阵列,选取合适的光源波长和光栅周期即可在衍射光斑没有干扰的情况下完成测量。

0.36 mm(F 数为 50)的微透镜阵列进行测试,测量系统如图 5 所示。

测量过程分两步:首先将光栅移出测量光路,利用清晰度函数完成对微透镜阵列的定焦;再将光栅移入光路中,用相机记录各级衍射斑以完成焦距测量。由于两级衍射斑的光强差异,可适当地增减衰减片调节各衍射斑的光强,用 768 pixel×576 pixel

4 测量结果

4.1 测量方案

利用该测量方案对焦距约为 18 mm,口径为

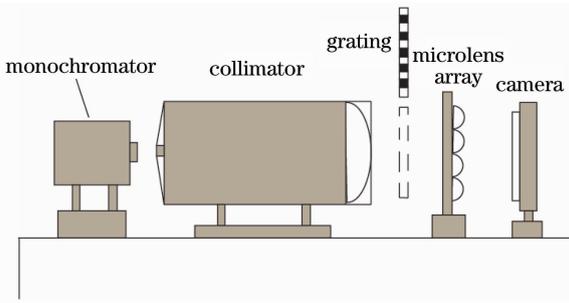


图5 测量系统简图

Fig. 5 Schematic of measuring system

的相机采集衍射光斑如图 6(a), (b)所示, 选取不同的阈值, 通过二值化图 6(b)所示图像可得到 0 级

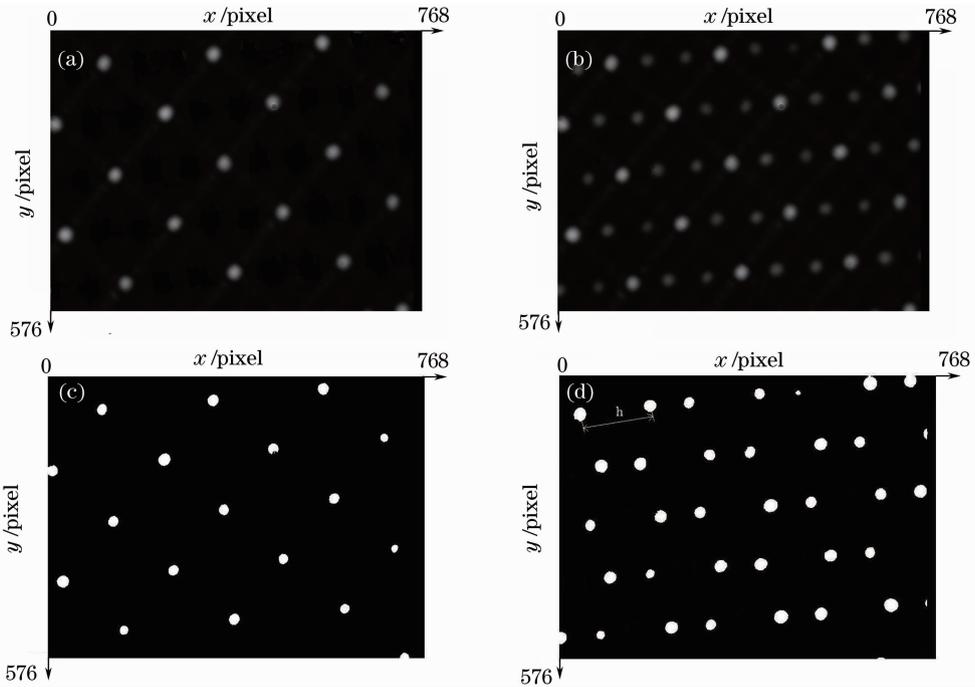


图6 光栅衍射斑图像。(a)清晰度函数定焦图像;(b)光栅测量图像;(c) 0级衍射光斑图像;(d) 1级衍射光斑图像

Fig. 6 Images of grating diffraction spot. (a) Image gathered by camera; (b) measurement image of grating; (c) image of 0-order diffraction spots; (d) image of 1-order diffraction spots

表3 焦距测量结果

Table 3 Measurement results of the focal length

Number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Average
Focal length /mm	17.47	17.61	17.46	17.75	17.59	17.71	17.65	17.53	17.66	17.44	17.60

4.2 测量误差分析

测量的主要误差来源为单色仪的波长误差、光栅周期误差、清晰度函数定焦误差和光斑中心距测量误差。

4.2.1 单色仪误差

单色仪在该波段(632.8 nm)工作的波长变化为 ± 5 nm, 由波长变化引起的焦距变化可忽略不计, 但由(8)式分析波长变化引起的光斑中心距, 最

[图 6(c)]和 1 级衍射斑[图 6(d)]的中心位置。

通过 Matlab 软件得到 1 级衍射光斑的中心, 从而得出微透镜阵列每个子单元的两个 1 级衍射斑的中心距 h [图 6(d)], 根据(8)式即可得出相应子单元的焦距。测量结果如表 3 所示。

在完成焦距测量的基础上可算出微透镜阵列的焦距一致性。焦距一致性定义为

$$f_{eq} = \frac{\max(f) - \min(f)}{f} \times 100\%. \quad (14)$$

由表 3 数据可计算出该被测微透镜阵列焦距一致性为 1.76%, 结果较好。

终导致的焦距测量误差为 0.8%。

4.2.2 光栅周期误差

利用高倍率多功能测量显微镜对光栅周期进行测量, 可得光栅周期引起的测量误差为 0.4%。

4.2.3 清晰度函数定焦误差

以 0.25 mm 步距在微透镜阵列焦面附近扫描, 测量结果表明清晰度函数定焦误差为 1.4%^[17]。

4.2.4 光斑中心距测量误差

利用 Matlab 软件计算光斑的中心误差为

1 pixel,测量过程中 2 个 1 级光斑的中心距 h 为 144 pixel,光斑中心距测量误差为 0.7%。

经误差合成可得利用该方法对微透镜阵列的焦距测量误差为 1.8%。

4.3 测量效率分析

利用清晰度函数定焦的原理为:从微透镜阵列的离焦位置以固定的步距采集图像,将各帧图像依次编号;利用 Matlab 读取各帧并计算微透镜阵列各子单元光斑的 Robert 函数值,通过清晰度函数曲线确定各子单元焦面位置(以采集图像编号表示)。根据定焦原理,微透镜阵列各子单元焦距计算公式应修正为

$$f_i = \frac{2\lambda}{hd} + (n_i - n_g)l, \quad (15)$$

式中 n_i 为被测子单元焦面位置的图像编号, n_g 为加入光栅测量时的位置编号, l 为相机移动的步距。利用清晰度函数定焦,结合光栅衍射测量,一次采集图像可完成多个微透镜阵列子单元的焦距测量,相比一些逐个测量的传统方法,该方法具有较高的测量效率。本次测量过程中,尽管选用的是视场较小的 768 pixel × 576 pixel 的 CCD,除去边缘部分的影响,一次仍可完成 10 个子单元的焦距测试。测量结果表明该方法适用于阵列子单元较多的微透镜阵列焦距测量。

另外,为方便采集图像的数据处理,一般要求微透镜阵列各子单元的两个 1 级衍射光斑在其口径范围内,即衍射光斑的中心距 h 应小于微透镜阵列的口径 D ,根据(8)式化简后有

$$\frac{D}{f} \geq \frac{2\lambda}{d}. \quad (16)$$

显然,该测量方案更适合于相对口径较大,即 F 数较小的微透镜阵列测试。

综上所述,利用光栅衍射法结合清晰度函数定焦对微透镜阵列焦距进行测量,具有较高的测量效率和测量精度,可用于阵列子单元较多、 F 数较小的微透镜阵列焦距测量。

5 结 论

利用 Matlab 软件对光栅各级衍射光在微透镜阵列焦面上光斑干扰状况进行模拟,分析了不同波长和光栅周期对微透镜阵列焦距测量的影响。选取合理的光源和光栅,利用基于光栅衍射的转角法,完成对微透镜阵列的焦距及其一致性的测量。测量结果表明,该方法对微透镜阵列焦距具有较高的测量

精度和测量效率,可用于阵列子单元多、 F 数较小的微透镜阵列测量。

参 考 文 献

- Jiang Xiaoping, Liu Desen. Fabrication of gradient refractive index hexagonal aperture planar microlens array based on spherical substrate [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1792~1795
- 蒋小平,刘德森. 变折射率球面六角形孔径平面微透镜阵列[J]. *光学学报*, 2010, **30**(6): 1792~1795
- Zhuang Xiaolei, Zhou Fang, Shen Su *et al.*. Characteristics of diffusers with cascaded-microlens arrays[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(11): 3306~3310
- 庄孝磊,周芳,申溯等. 层叠微透镜阵列光扩散片特性研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(11): 3306~3310
- Li Xiaogang, Chen Jimin, Liu Furong *et al.*. PMMA microlens array preparation using carbon dioxide laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(s1): 100104
- 李晓刚,陈继民,刘富荣等. 二氧化碳激光制备 PMMA 微透镜阵列[J]. *光学学报*, 2010, **30**(s1): 100104
- Geun Young Yoon, Takahisa Jitsuno, Masahiro Nakatsuka *et al.*. Shack-Hartmann wave-front measurement with a large F -number plastic microlens array [J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(1): 188~192
- Liu Desen, Hu Jianmin, Liu Xiaodong *et al.*. Studies on the optical properties of microlens array for planar intersect glasses waveguide [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(7): 782~785
- 刘德森,胡建明,刘晓东等. 平面交叉玻璃波导型微透镜阵列光学性能研究[J]. *光子学报*, 2003, **32**(7): 782~785
- He Miao, Yi Xinjian, Cheng Zuhai *et al.*. Research on fabrication and optical performance testing of silicon microlenses array with large F -number [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **27**(12): 1097~1102
- 何苗,易新建,程祖海等. 大 F 数硅微透镜阵列的制作及光学性能测试研究[J]. *中国激光*, 2000, **27**(12): 1097~1102
- Alam A. Camacho P., Cristina Solano, Gimignano Martinez-Ponce *et al.*. Simple method to measure the focal length of lenses [J]. *Opt. Engng.*, 2002, **41**(11): 2899~2902
- F. Lei, L. K. Dang. Measurement of the numerical aperture and F -number of a lens system by using a phase grating [J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(28): 5689~5691
- Brian J. DeBoo, Jose M. Sasian. Novel method for precise focal length measurement [C]. *International Optical Design Conference*, 2002, 114~121
- F. Lei, L. K. Dang. Measuring of the focal length of optical system by grating shearing interferometry [J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(28): 6603~6608
- Zhang Peng, Cao Xuedong, Wu Shibin *et al.*. The application of image processing technology for the measurement of micro-lens array focus [J]. *Electronic Instrumentation Customer*, 2008, (5): 15~16
- 张鹏,曹学东,吴时彬等. 基于图像测量技术的微透镜定焦方法研究[J]. *仪器仪表用户*, 2008, (5): 15~16
- Zhang Yuhong, Liu Baoyuan. Testing of optical preparation of microlens array [J]. *Science and Technology of West China*, 2008, **27**(7): 14~16
- 张玉虹,刘宝元. 聚合物微透镜阵列的光学性能测试[J]. *中国西部科技*, 2008, **27**(7): 14~16
- Shuai Zhao, Jacky Fung Wen, Po Sheun Chung. Simple focal-length measurement technique with a circular dammann grating [J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(1): 44~49
- Jiao Guohua, Li Yulin, Hu Baowen. Measurement of microlens array surface by mirau phase changed interferometer [J]. *Acta*

- Photonica Sinica, 2007, **36**(10): 1924~1927
- 焦国华, 李育林, 胡宝文. Mirau 相移干涉法测量微透镜阵列面型[J]. 光子学报, 2007, **36**(10): 1924~1927
- 15 Daniel R. Neal, James Copland, David A. Neal *et al.*. Measurement of lens focal length using multi-curvature analysis of Shack-Hartmann wavefront data [C]. SPIE, 2004, **5523**: 243~255
- 16 Yeddanapudi Pavan Kumar, Sanjib Chatterjee. Technique for the focal-length measurement of positive lenses using Fizeau interferometry[J]. Appl. Opt., 2009, **48**(4): 730~736
- 17 Alma A. Camacho, P. Cristina Solano, Moises Cywiak *et al.*. Method for the determination of the focal length of a microlens [J]. Opt. Engng., 2000, **39**(8): 2149~2152
- 18 Arun Anand, Vani K. Chhaniwal. Measurement of parameter of simple lenses using digital holographic interferometry and a synthetic reference wave [J]. Appl. Opt., 2007, **46**(11): 2022~2026
- 19 Hou Changlun, Bai Jian, Hou Xiyun. The measurement of long focal length based on talbot effect of ronchi grating[J]. Acta Optica Sinica, 2002, **22**(11): 1328~1330
- 侯昌伦, 白 剑, 侯西云. 基于龙基光栅塔尔博特效应的长焦距测量[J]. 光学学报, 2002, **22**(11): 1328~1330
- 20 Zhu Xianchang, Cao Xuedong, Wu Shibin *et al.*. Focal length measurement of microlens by rotation method based on grating multiply diffraction [J]. Acta Optica Sinica, 2011, **31**(5): 0523001
- 朱咸昌, 曹学东, 吴时彬 等. 基于光栅多缝衍射测量微透镜焦距[J]. 光学学报, 2011, **31**(5): 0523001
- 21 Liang Quanting. Physical Optics [M]. Beijing: China Machine Press, 1980. 136~137
- 梁铨廷. 物理光学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1980. 136~137
- 22 Zheng Guangwei, Liu Li, He Yanlan. Diffraction properties of ultra-short pulsed Gaussian laser beam by transmission volume grating[J]. Acta Optica Sinica, 2008, **29**(1): 126~131
- 郑光威, 刘 莉, 何焰蓝. 透射型体光栅对超短脉冲高斯光束衍射特性研究[J]. 光学学报, 2008, **29**(1): 126~131
- 23 Zhang Weiguo, Dong Xiaochun, Gao Hongtao *et al.*. Disturbance induced by diffraction effects of microlens array [J]. Opto-Electronic Engineering, 2010, **37**(5): 80~84
- 张为国, 董小春, 高洪涛 等. 微透镜阵列衍射效应所致的串扰[J]. 光电工程, 2010, **37**(5): 80~84

栏目编辑: 韩 峰