

文章编号: 1001-3806(2017)03-0421-06

参考光为平面波和球面波时焦距检测对比研究

张巧鸽, 楼宇丽, 宋庆和, 桂进斌, 李重光*

(昆明理工大学 理学院, 昆明 650500)

摘要: 为了研究参考光波面形状对于测量透镜焦距值的影响, 采用数字全息的方法进行了理论分析和实验验证。通过在两种色光下进行实验, 分别测量出参考光为平面波和球面波时的焦距值, 并与标称值和理论计算值进行了比较。结果表明, 当参考光为平面波时, 测量到的透镜焦距值与标称值和理论计算值相对误差在 5% 以上; 而当参考光为球面波时, 与两者的相对误差均在 2% 以下, 因此当参考光为球面波时所测量的焦距值精度更高; 通过计算得出这两种参考光所测量的焦距值都在理论焦深范围内, 故利用测量焦距值对全息图进行重构时所获得的再现像与用标称值和理论计算值所得到的再现像质量相当。这一结果对测量透镜焦距值和数字全息图重建方面有一定的帮助。

关键词: 全息; 焦距测量; 参考光波面形状; 焦深

中图分类号: O438.1

文献标志码: A

doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2017.03.023

Comparative study on lens focal length measured with planar and spherical reference wave

ZHANG Qiaoge, LOU Yuli, SONG Qinghe, GUI Jinbin, LI Chongguang

(College of Science, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: In order to study influence of the surface shape of reference wave on lens focal length, digital holography method was used for theoretical analysis and experimental verification. Focal length was measured respectively with planar reference wave and spherical reference wave at different wavelengths. And then, the measured values were compared with the nominal values and the theoretical calculation values. The results show that the relative errors are above 5% between the measured value, the nominal value and the theoretical calculation value with planar reference wave. The relative errors are below 2% with spherical reference wave. Therefore, the precision of focal length measured by spherical reference wave is higher. After calculation, focal lengths measured by two different reference lights are within the range of theoretical depth of focal. Therefore, the reconstructed image obtained by the measured value is equivalent to the reconstructed image obtained by the nominal value and the theoretical value. So the spherical reference wave has higher precision to the measurement results. Both kinds of reference wave are within the scope of the theoretical depth of focus. So the quality of the reconstructed images which are calculated with measured values, the nominal values and the theoretical calculating values is about the same. The study provides guidance for measurement of lens focal length and wavefront reconstruction of digital holography.

Key words: holography; focal length measurement; surface shape of reference wave; depth of focus

引 言

透镜是组成光学系统的主要元件。全息术^[1-6]中, 物体到电荷耦合器件(charge-coupled device, CCD)^[7-8]

的距离在重构再现像中是一个重要参量。对于投影尺寸远大于 CCD 面阵尺寸的物体, 为较好接收物光场信息, 选择合适的光学系统对物光场进行变换是常采用的手段。这时, 光学系统中所使用透镜的焦距值准确与否将直接影响到重构图像的质量好坏。因此, 知道一个透镜或者透镜组的焦距值是很有必要的。

在精度要求不高的情况下, 人们常采用自准直法^[9]、物距像距法、共轭法等方法来测量透镜焦距, 这些测量方法虽然实验过程比较简单, 但是精度和准确性不高。随着激光技术和微电子技术^[10]的发展, 借助 CCD, 通过数字全息术, 利用干涉的方法, 可以更加精确地测量透镜焦距值。已有一些学者利用此方法得到了比较理想的结果, 现主要研究参考光波面形状对测

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61465005; 61540075; 61565011); 云南省级人培基金资助项目(KKSY201407082; KKSY201307134); 云南省科技计划资助项目(2013FB025; 2014FB132); 云南省高等学校卓越青年教师特殊培养资助项目(1096826901)

作者简介: 张巧鸽(1991-), 女, 硕士研究生, 现主要从事显微数字全息超分辨方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: Licg66@qq.com

收稿日期: 2016-07-13; 收到修改稿日期: 2016-09-13

量结果的影响。

作者根据理论推导,利用数字全息方法来测量透镜焦距。对于同一个透镜,当参考光采用平面波和球面波与物光进行干涉时,用 CCD 记录其干涉条纹,对比两种情况下所计算出的焦距值,并与标称值和理论计算值相比较,最后通过数字全息重建图像对测量结果进行验证。

1 原理

实验中选取单个透镜为研究对象,通过干涉方法来测量透镜焦距值,原理如图 1 所示。

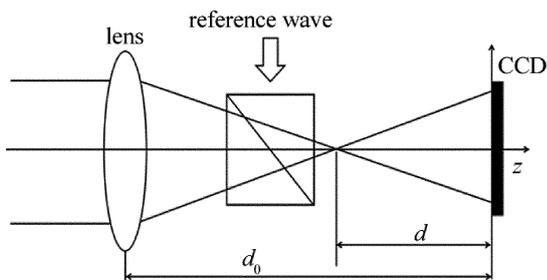


Fig. 1 Principle diagram of interferometry

通过透镜的物光波与参考光波经过分束镜在 CCD 面上发生干涉,并记录下干涉条纹。先测量出待测透镜到 CCD 的距离 d_0 ,再通过分析干涉条纹,计算出该位置的球面波波面半径 d ,最后根据公式 $f = d_0 - d$ 即可求出待测透镜的焦距值。

下面分别讨论参考光为平面波及球面波时两种情况。

1.1 参考光为平面波

参考光为平面波的光路图如图 2 所示。

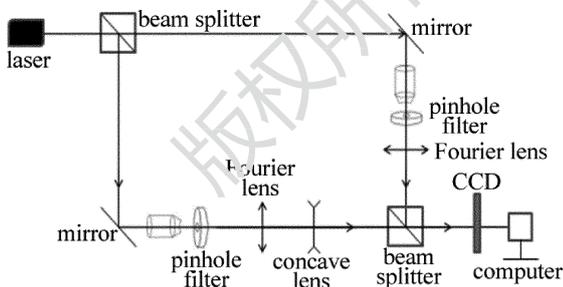


Fig. 2 Path diagram of plane reference wave

激光通过分束镜后形成两束光:一束光通过待测透镜后形成球面波,将其视为物光;另一束通过傅里叶透镜的光波调节成平面波,将其视为参考光。该球面物光波与平面参考光波在分束镜相遇,在 CCD 面发生干涉,通过对干涉条纹进行分析,测量出 CCD 前球面波波面半径 d ,然后根据 $f = d_0 - d$ 即可求出透镜焦距值。以下给出参考光为平面波时的理论分析。

令 $u_o(x, y) = Q_o \exp\left[\frac{jk}{2d}(x^2 + y^2) + j\varphi_o\right]$ 为从待测

透镜出射到 CCD 平面的球面物光波, k 为波数, λ 为波长, Q_o 为振幅, φ_o 为相位角。两者干涉场为:

$$u_o(x, y) + A = Q_o \exp\left[\frac{jk}{2d}(x^2 + y^2) + j\varphi_o\right] + A \quad (1)$$

式中, A 是到达 CCD 平面的平面参考光波。

干涉场强度为:

$$\begin{aligned} |u_o(x, y) + A|^2 &= Q_o^2 + A^2 + \\ &2Q_o A \cos\left[\frac{\pi}{\lambda d}(x^2 + y^2) + \varphi_o\right] \end{aligned} \quad (2)$$

换算到极坐标下,即 $x^2 + y^2 = r^2$, 光强为:

$$\begin{aligned} |u_o(r) + A|^2 &= \\ &Q_o^2 + A^2 + 2Q_o A \cos\left(\frac{\pi r^2}{\lambda d} + \varphi_o\right) \end{aligned} \quad (3)$$

可知当满足下面干涉条件时,出现干涉亮纹:

$$\frac{\pi}{\lambda d} r^2 + \varphi_o = 2m\pi, \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (4)$$

令 $m = k, k + 1$ ($k = 0, 1, 2, \dots$), 对于两相邻级,由上式可得:

$$\frac{\pi}{\lambda d} (r_{k+1}^2 - r_k^2) = 2\pi \quad (5)$$

$$d = \frac{r_{k+1}^2 - r_k^2}{2\lambda} \quad (6)$$

式中, r_{k+1} 和 r_k 分别为相邻的第 $k + 1$ 级和第 k 级圆环的半径,如要测量半径,必须知道环心的位置,实验中这一位置不易确定,故测量半径误差较大。对(6)式进行整理,将半径化为直径,令 $D_{k+1} = 2r_{k+1}$ 及 $D_k = 2r_k$, 则:

$$d = \frac{D_{k+1}^2 - D_k^2}{8\lambda} \quad (7)$$

式中, d 是到达 CCD 接收面的球面波的波面半径,可以利用 CCD 测量的全息图上相邻两干涉环的直径来确定 d 。为了更加精确,可多次测量求平均值,然后根据公式 $f = d_0 - d$ 计算出透镜焦距值。

1.2 参考光为球面波^[11]

参考光为球面波的光路图,与参考光为平面波相比,只需将参考光处的傅里叶透镜撤除,所得到的参考光即为球面波。这部分内容参考文献[11]中已经推导过,现为了对比方便,引用出参考文献中主要的 4 个公式。以下给出参考光为球面波时的理论分析。

令 $u_o(x, y) = Q_o \exp\left[\frac{jk}{2d}(x^2 + y^2) + j\varphi_o\right]$ 为从待测透镜出射到 CCD 平面的球面物光波,令 $u_{re}(x, y) = Q_{re} \exp\left[\frac{jk}{2d_{re}}(x^2 + y^2) + j\varphi_{re}\right]$ 为到达 CCD 平面的球面参考光波。两者干涉场为:

$$u_o(x, y) + u_{re}(x, y) = Q_o \exp\left[\frac{jk}{2d}(x^2 + y^2) + j\varphi_o\right] +$$

$$Q_{re} \exp\left[\frac{jk}{2d_{re}}(x^2 + y^2) + j\varphi_{re}\right] \quad (8)$$

换算到极坐标下,即 $x^2 + y^2 = r^2$, 干涉强度可表示如下:

$$|u_o(x, y) + u_{re}(x, y)|^2 = Q_o^2 + Q_{re}^2 + 2Q_o Q_{re} \cos\left[\frac{\pi}{\lambda}\left(\frac{1}{d} - \frac{1}{d_{re}}\right)r^2 + \varphi_o - \varphi_{re}\right] \quad (9)$$

同理得到:

$$d = \frac{(r_{k+1}^2 - r_k^2)d_{re}}{r_{k+1}^2 - r_k^2 + 2\lambda d_{re}} \quad (10)$$

同样,令 $D_{k+1} = 2r_{k+1}$ 及 $D_k = 2r_k$, 得到下式:

$$d = \frac{(D_{k+1}^2 - D_k^2)d_{re}}{D_{k+1}^2 - D_k^2 + 8\lambda d_{re}} \quad (11)$$

式中, d 为通过待测透镜的球面波波面半径, d_{re} 是参考球面波的波面半径,可直接测得。通过 CCD 读出相邻两干涉环的直径后带入公式即可求出 d 。同样多次测量求平均值,然后根据公式 $f = d_0 - d$ 计算出透镜焦距值。

2 实验研究

2.1 参考光为平面波

实验中,待测透镜的焦距是一个标称值为 -100mm 的凹透镜(对应于 587.6nm 的黄光)。为了更具有说服力,实验中分别采用了比黄光波长长的 632.8nm 的红光和比黄光波长短的 532nm 的绿光,在透镜后 $d_0 = 352.5\text{mm}$ 的位置记录干涉条纹,如图 3 所示。

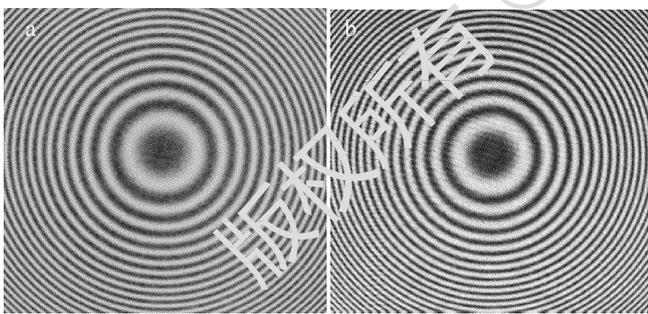


Fig. 3 Interference pattern of plane reference wave
a— $\lambda = 632.8\text{nm}$ b— $\lambda = 532\text{nm}$

根据上面推导的公式 $d = \frac{D_{k+1}^2 - D_k^2}{8\lambda}$, 通过读取干

涉图样相邻两条纹间距,代入公式计算后求得到达 CCD 平面的两种色光的波面半径分别为:红光 $d_r = 476.3\text{mm}$, 绿光 $d_g = 466.6\text{mm}$ 。根据 $f = d_0 - d$ 和 $d_0 = 352.5\text{mm}$ 计算得到:红光 $f_r = d_0 - d_r = 352.5 - 467.3 = -114.8\text{mm}$; 绿光 $f_g = d_0 - d_g = 352.5 - 466.6 = -114.1\text{mm}$ 。

从实验光路图中可以看到,光束在到达 CCD 平面进行干涉前经过了一个分束镜,由于分束镜的折射率

与空气的折射率存在差异,这会对检测到的球面波波面半径造成影响,为了得到更精确的测量结果,必须对波面半径进行修正。

根据光学理论可知,两点之间距离不变时,若插入一个折射率为 n 且厚度为 t 的透明介质,则光程的变化量为 $\delta = t(1 - 1/n)$ 。然而对于同一介质,不同波长的光对应不同的折射率,所以需要计算不同波长的光对应的折射率。

本实验中使用的分束镜型号为 DCL1010407 (K9L), 材质为 H-K9L(517642), 厚度 $t = 25.4\text{mm}$, 其在 587.6nm 波长下的折射率 $n = 1.51680$ 。根据插值公式 $n^2 = a_0 + a_1\lambda^2 + a_2\lambda^{-2}$ ^[12-13], 以及生产厂家提供的几种波长及其对应的折射率,就可计算出 3 个系数,分别是: $a_0 = 2.261$, $a_1 = 1.439 \times 10^{-2} \mu\text{m}^2$, $a_2 = -2.944 \times 10^{-4} \mu\text{m}^4$ 。对于波长为 632.8nm 的红光和 532nm 的绿光,根据上式得到其对应的折射率:红光 $n_r = 1.51509$; 绿光 $n_g = 1.51947$ 。

由光程变化量公式 $\delta = t(1 - 1/n)$, 计算得到 $\delta_r = 8.64\text{mm}$, $\delta_g = 8.68\text{mm}$ 。然后对上面焦距的测量值进行修正,根据修正值公式 $f' = d_0 - (d - \delta)$ 得到:红光 $f'_r = -106.2\text{mm}$; 绿光 $f'_g = -105.4\text{mm}$ 。

2.2 参考光为球面波^[11]

实验过程与平面波相同, $d_0 = 385.0\text{mm}$ 。根据推导公式 $d = \frac{(D_{k+1}^2 - D_k^2)d_{re}}{D_{k+1}^2 - D_k^2 + 8\lambda d_{re}}$, 得到两种色光的波面半径分别为:红光 $d_r = 495.2\text{mm}$, 绿光 $d_g = 493.6\text{mm}$ 。根据 $f = d_0 - d$, $d_0 = 385.0\text{mm}$, 得到:红光 $f_r = d_0 - d_r = 385.0 - 495.2 = -110.2\text{mm}$; 绿光 $f_g = d_0 - d_g = 385.0 - 493.6 = -108.6\text{mm}$ 。

由 $\delta = t(1 - 1/n)$ 和 $f' = d_0 - (d - \delta)$ 得到修正值:红光 $f'_r = -101.6\text{mm}$; 绿光 $f'_g = -99.9\text{mm}$ 。

2.3 焦距理论值计算

根据相关文献可知,透镜的焦距与入射波长相关^[14], 在不同波长下透镜的焦距值与其对应折射率的关系式为:

$$f_i = f_0 \frac{(n_0 - 1)}{(n_i - 1)} \quad (12)$$

根据该式可知,如果知道透镜与某一光波长对应的焦距值和折射率,以及任一光波对应的折射率,就可求出相应的焦距值。下标 $i = r, g$, 分别表示红光或绿光。

实验中透镜焦距标称值 $f_0 = -100\text{mm}$, 在 587.6nm 波长下,对应折射率为 $n_0 = 1.51680$, 利用该式就可以计算出实验中两种色光对应的焦距值。已知透镜材质为 K9L 系列玻璃,利用前面的计算结果,可知其对应两种光波长的折射率分别为: $n_r = 1.51509$, $n_g =$

1.51947。计算得到与之对应的焦距值分别为:红光

$$f_r = f_0 \frac{n_0 - 1}{n_r - 1} = -100 \times \frac{1.51680 - 1}{1.51509 - 1} = -100.3 \text{mm}; \text{绿光}$$

$$f_g = f_0 \frac{n_0 - 1}{n_g - 1} = -100 \times \frac{1.51680 - 1}{1.51947 - 1} = -99.5 \text{mm}.$$

2.4 实验数据对比分析

由表 1 可知,平面波作为参考光时,测量值与标称

Table 1 Comparison of the measured value, the nominal value and the theoretical calculation value

	nominal value		theoretical value		measured value with plane wave		measured value with spherical wave	
λ/nm	yellow 587.6	red 632.8	green 532		red 632.8	green 532	red 632.8	green 532
n	1.51680	1.51509	1.51947		1.51509	1.51947	1.51509	1.51947
d/mm	—	—	—		467.3	466.6	495.2	493.6
d_0/mm	—	—	—		352.5	352.5	365.0	385.0
f/mm	-100	-100.3	-99.5		-114.8	-114.1	-110.2	-108.6
δ/mm	—	—	—		8.64	8.68	8.64	8.68
f'/mm	-100	-100.3	-99.5		-106.2	-105.4	-101.6	-99.9
error with nominal value/%	—	0.3	0.5		6.2	5.4	1.6	0.1
error with theoretical value/%	—	—	—		5.9	5.9	1.3	0.4

3 实验验证

利用全息的方法对一个大小为 105mm × 75mm 的泥塑彩绘猴王头像进行拍摄。在激光照射下,散射光通过凹透镜和分束镜到达 CCD 形成物光,其与到达 CCD 的参考光进行干涉。实验中分别用 $\lambda = 632.8 \text{nm}$ 的红光和 $\lambda = 532 \text{nm}$ 的绿光进行实验。

相关的实验参量如下:透镜焦距为 -100mm (标称值),物体到凹透镜的距离为 220mm (即物距 $s = 220 \text{mm}$),凹透镜到 CCD 的距离为 531mm (即 $d_1 + d_2 + d_3 = 531 \text{mm}$),CCD 面阵有效像素 1024×1024 ,物

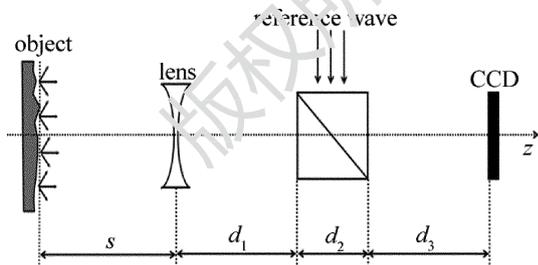


Fig. 4 The simplified light path of digital hologram recording

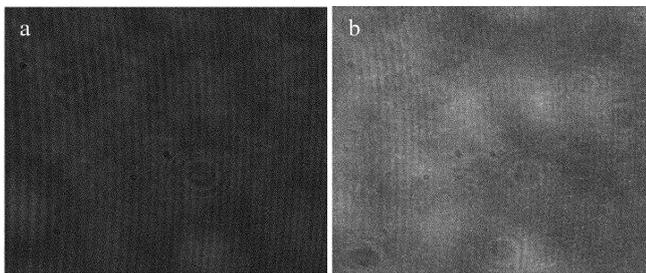


Fig. 5 Hologram captured in experiments
a— $\lambda = 632.8 \text{nm}$ b— $\lambda = 532 \text{nm}$

值及理论计算值间的相对误差均在 5% 以上;而球面波作为参考光时,测量值与标称值及理论计算值间的相对误差均在 2% 以下。因此得出结论,使用球面波作为参考光测量的焦距值要优于用平面波作为参考光的实验结果。可知当平面波作为参考光时,难以确保其为绝对的平面波,由此利用干涉条纹进行的计算时就会引入误差。

理宽度 $L = 4.76 \text{mm}$ 。其记录光路如图 4 所示,拍摄到的全息图如图 5 所示。

利用所拍摄到的全息图,在对应的波长下,分别将透镜的标称值、理论计算值、平面参考光波测量值和球面参考光波测量值带入到利用单次快速傅里叶 (single fast Fourier transformation, S-FFT) 算法再现的程序中,取其 +1 级像,观察 4 幅图的异同。

由图 6 可见,仅从肉眼观察,带入不同焦距值的重建像没有明显区别,这说明采用平面参考光波和球面参考光波所测量的焦距值都是近似准确的。

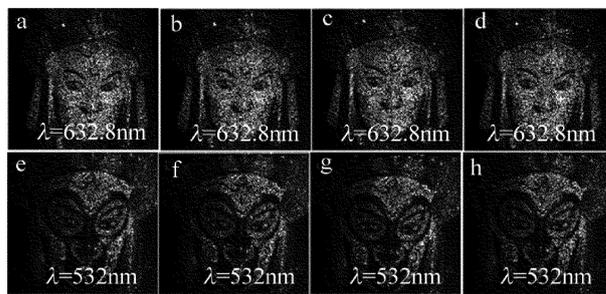


Fig. 6 The reconstructed images with different lens focal lengths
a, e—the nominal value b, f—the theoretical calculation value c, g—the measured value with plane wave d, h—the measured value with spherical wave

考查参考光为平面波和球面波所测量焦距的误差是否在重建像的焦深范围内,便能对这两种方法所测量的焦距值是否准确给出进一步证明。已有一些学者给出数字全息 S-FFT 算法重建图像的焦深表达式 $\delta_{\text{FFT}} = 1.5\lambda z_0^2 / L^2$ [15] (其中 λ 为激光波长, z_0 为全息记录距离, L 为 CCD 的宽度)。

根据高斯公式 $1/s + 1/s' = 1/f$, 带入物距 s 和透镜焦距 f (即标称值、理论计算值、平面波测量值和球面波测量值, 其中, 将标称值设为 f_0 , 其它值设为 f_0') 算出像距 s' , 由于光路中有分束镜 (厚度为 25.4mm, 不同波长的折射率分别为黄光 $n_y = 1.51680$, 红光 $n_r =$

1.51509, 绿光 $n_g = 1.51947$), 因此还要加上由于透镜所增加的光程 Δl , 再根据公式 $z_0 = s' + d_1 + d_2 + d_3 + \Delta l$, 算出全息记录距离 z_0 , 然后进行对比分析 (单位为 mm)^[16-18]。

由表 2 可以看出, 无论是通过平面参考光波还是

Table 2 Depth of focus at different wavelengths and distances

	nominal value		theoretical value		measured value with plane wave		measured value with spherical wave	
λ/nm	yellow 587.6	red 632.8	green 532		red 632.8	green 532	red 632.8	green 532
f'/mm	-100	-100.3	-99.5		-106.2	-105.4	-101.6	-99.9
z_0/mm	612.9	613.0	612.7		615.7	615.5	613.6	612.9
$\delta_{\text{FFT}}/\text{nm}$	14.6	15.7	13.2		15.9	13.3	15.8	13.2
$ f_0 - f_0' $	0	0.3	0.5		6.2	5.4	1.6	0.1

球面参考光波所测得的焦距值都在焦深范围内, 所以基于上述焦距值都能得到较清晰再现像, 从而得到图 6 中每一波长下没有明显差异的 4 幅重建像。这说明利用平面参考光波或球面参考光波测量出来的焦距值在要求不高的情况下, 均可认为是近似准确的。

为了更精确地对比 4 幅图像的区别, 在其重建像的 +1 级选取相同位置的 100 个像素点对比其光强度曲线, 见图 7 和图 8。

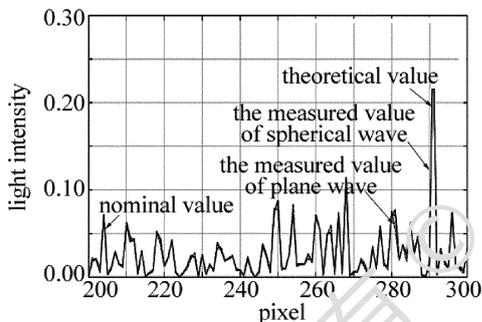


Fig. 7 Light intensity curve of 100 pixel as the same location when $\lambda = 632.8\text{nm}$

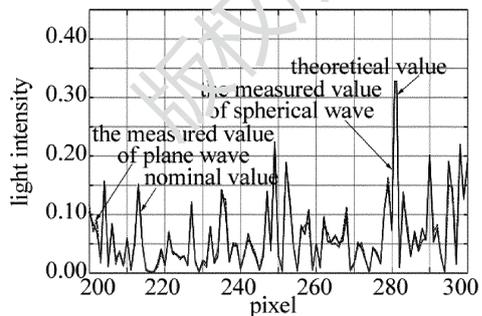


Fig. 8 Light intensity curve of 100 pixel as the same location when $\lambda = 532\text{nm}$

图 7 和图 8 中, 实线为带入标称值的强度曲线; 点线为带入理论计算值的强度曲线; 点划线为带入平面参考光波测量值的强度曲线; 虚线为带入球面参考光波测量值的强度曲线。由图可见, 4 条曲线基本吻合, 但存在微小差异。还可以看到, 球面参考光波所测量焦距值更加接近标称值和理论计算值的再现强度曲

线, 而平面参考光波测量焦距值的再现像强度曲线 (图中点划线) 却在其它强度曲线周围上下微小波动。这说明用球面参考光波所测量的焦距值要优于平面光波所测量的结果。

4 结 论

基于数字全息的方法, 使用参考光为平面波和球面波来测量透镜焦距值, 通过实验研究发现, 使用平面参考光波和球面参考光波所测量的焦距值都是近似准确的。但是对比数据和图表可知, 平面波作为参考光时, 测量值与标称值及理论计算值间的相对误差均在 5% 以上; 而球面波作为参考光时, 测量值与标称值及理论计算值间的相对误差均在 2% 以下, 这说明使用球面波作为参考光的实验结果略优于用平面波作为参考光的实验结果。通过研究焦深发现, 使用平面参考光波和球面参考光波所测量的焦距误差都在其焦深范围内, 因此, 利用测量焦距值重构全息图所获得的再现像与用标称值及理论计算值所得到的再现像质量相当。期望这一研究能够对测量透镜焦距值和数字全息图重建方面给与有意义的参考。

参 考 文 献

- [1] CHEN H M, ZHAO X Y. Principles and application of laser [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009: 297-317 (in Chinese).
- [2] YU M W. Optical holography and the application [M]. Beijing: Beijing University Press of Science and Technology, 1996: 70-87, 276-292 (in Chinese).
- [3] GOODMAN J W. Introduction to Fourier optics [M]. 3rd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011: 211-274 (in Chinese).
- [4] HARIHARAN P. Optical holography: principles, techniques, and applications [M]. London, UK: Cambridge University Press, 1996: 181-210.
- [5] YAMAGUCHI I, KATO J, OHTA S. Surface shape measurement by phase-shifting digital holography [J]. Optical Review, 2001, 8 (2): 85-89.
- [6] LI J Ch, XIONG B H. information optics theory and calculations

- [M]. Beijing: Science Press, 2009: 574-591 (in Chinese).
- [7] WANG Y Q. The CCD application technology [M]. Tianjin: Tianjin University, 2000: 30-45 (in Chinese).
- [8] LABELLE R D, GARVEY S D. Introduction to high performance CCD cameras [C]//IEEE Xplore International Congress on Instrumentation in Aerospace Simulation Facilities. New York, USA: IEEE, 1995: 301-305.
- [9] LI W J. University physics experiment course [M]. Changsha: Hunan University Press, 2006: 100-101 (in Chinese).
- [10] CHEN X. The development and application of microelectronic technology [J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2014 (16): 141-147 (in Chinese).
- [11] WANG X H, LIU C, LU S Y, *et al.* Detection of focal length based on color digital holography [J]. Laser Technology, 2015, 39 (4): 562-565 (in Chinese).
- [12] JIA F, FENG Z Y, ZHOU L B, *et al.* Three dimensional surface shape measurement of big objects of pre-imaging digital holography [J]. Acta Photonica Sinica, 2008, 37 (11): 2239-2243 (in Chinese).
- [13] CUI H B, LI Y P, DUAN K M. Optics [M]. Beijing: Science Press, 2008: 224 (in Chinese).
- [14] LI J Ch, PENG Z J, TANKAM P, *et al.* Digital holographic reconstruction of a local object field using an adjustable magnification [J]. Journal of the Optical Society of America, 2011, A28 (6): 1291-1296.
- [15] WANG H Y, ZHAO B Q, SONG X F. Focal depth of Fresnel digital holographic imaging system [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29 (2): 374-377 (in Chinese).
- [16] TANG X H, WEN G J. Three methods of measuring lens focal length [J]. Journal of Physics Teaching, 2006, 24 (14): 33 (in Chinese).
- [17] XU Q P. A new method for measuring the focal length of thin lens by parallel light [J]. Henan Science, 2013, 31 (11): 1860-1862 (in Chinese).
- [18] CHNE R J, TAN H Z, TAN W Q, *et al.* A fast lens focus measurement method based on blurred image processing [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35 (2): 02150022 (in Chinese).

《激光技术》编辑部