

# 可消除光场畸变的物面平移横向剪切数字全息

潘卫清<sup>1</sup> 龚国芳<sup>2</sup>

<sup>1</sup>浙江科技学院理学院, 浙江 杭州 310023

<sup>2</sup>浙江大学机械工程学系, 浙江 杭州 310027

**摘要** 提出了一种可根本消除各种光场畸变的横向剪切数字全息方法, 采用三幅物面相互存在微小平移的数字全息图, 通过波前差分来消除照明光和参考光引入的相位畸变, 用横向剪切波前重构算法恢复待测物面三维数据。设计了一个反射式实验检测光路, 光路中人为引进未知的波前畸变对该算法进行了实验验证。结果表明, 在没有对物面和 CCD 记录面做严格方位校准, 横向平移精度为 0.01 mm, 平移量为 0.02 mm 的条件下, 标准相位的均方根误差约为  $\lambda/14$ , 分析了其误差来源, 可用于超精密光学三维测量, 有望减小光场畸变提高测量精度。

**关键词** 全息; 数字全息; 物面平移; 横向剪切; 光场畸变

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0709001

## Lateral Shearing Digital Holography with Objective Translation to Eliminate Optical Phase Aberration

Pan Weiqing<sup>1</sup> Gong Guofang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Science, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou, Zhejiang 310023, China

<sup>2</sup>Department of Mechanical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China

**Abstract** A lateral shearing digital holography to completely eliminate optical phase aberration is present. Based on three sequentially digital holograms by lateral translation, three phases are obtained from the holograms. The optical aberration is eliminated by subtracting the phases each other and two phase differences of the wavefront under test are obtained. Lastly, the objective three-dimensional phase without optical aberration is reconstructed through the phase differences based on Fourier expansion. An interferometer optical path in reflective configure is designed to demonstrate the proposed method. Two aberrational lenses are introduced into the path to produce unknown optical phase aberrations. The demonstration experiments are carried out without parallel calibration between the CCD plane and the test objective plane. In the experiments, the translation displacement is 0.02mm with the translation resolution of 0.01mm. The experimental results show that the root mean squared error is about  $\lambda/14$  between the phase of the proposed method and the standard phase without aberration. The error sources are analyzed. The proposed lateral shearing digital holography can be used to ultra-precise optical measurement through eliminating optical phase aberration to increase the measurement resolution.

**Key words** holography; digital holography; objective translation; lateral shear; optical phase aberration

**OCIS codes** 090.1995; 090.1000; 120.6650; 120.5050

## 1 引言

数字全息借助光电探测器和数字处理技术可获取物光的相位信息<sup>[1-2]</sup>, 还原物的三维形貌<sup>[3-4]</sup>, 具有快速、无损和高分辨等三维成像的优点。近年来, 数字全息技术受到了众多研究者的关注, 被广泛应用于生物医学检测<sup>[5]</sup>、粒子场测量、形貌分析、形变振动测量和信息加密等领域<sup>[6-9]</sup>。

目前常用的数字全息一般均采用离轴全息记录光路<sup>[10]</sup>, 光波通过待测物体产生变形, 进而与参考光波干

收稿日期: 2015-03-02; 收到修改稿日期: 2015-03-30

作者简介: 潘卫清(1976—), 男, 博士, 副教授, 主要从事光电信息技术方面的研究。E-mail: pan\_weiqing@163.com

涉叠加,并用 CCD 记录全息干涉条纹,最后通过数字处理提取其中的相位信息。显然,数字全息图中的相位分布反映的是物光与参考光的相位差。为了使该相位能准确反映待测物体的形貌或折射率信息,一般假设参考光波是标准的平面波。然而严格的平面波是很难得到的,而且干涉光路中的参考光和物光一般都要经过若干个透镜或反射镜才能到达 CCD 面,因此全息记录系统中的光场畸变是在所难免的。为了消除或减少光场畸变带来的测量误差,最直接的方法是选用严格的平面或球面反射镜做测量参考镜,并用精确准直的平面波做入射光波,但这种方法会增加全息记录系统的硬件成本,同时提高了光路调节的难度。另一种消除畸变的办法是采用数字补偿法,包括参考相位相减法<sup>[11-12]</sup>、数字相位掩模补偿法<sup>[13-14]</sup>、利用参考共轭全息补偿法<sup>[15]</sup>和系统标定畸变校正法<sup>[16]</sup>等。但数字补偿法也存在许多应用局限,例如相位相减法需要预先记录参考平面光的数字全息图,对于反射式数字全息由于难以保证参考平面与测量物体的位置准确重合会引入较大误差;数字相位掩模补偿法和系统标定畸变校正法需要预先知道系统畸变的数学模型,再用最小二乘拟合合法确定畸变参数,数字处理较为复杂。

横向剪切干涉是将待测波面与其自身的一个微小平移进行干涉,从相互垂直方向上剪切干涉图获得差分波前,并用波前重建算法恢复出待测的三维波前。与数字全息相比,横向剪切干涉无需参考光,但光路和装置要比数字全息复杂,所得的干涉条纹包含的是待测波前的梯度信息,所以条纹空间频率要低于数字全息。因此, Ferraro 等<sup>[17-18]</sup>将横向剪切最小二乘波前重构算法引入数字全息,用于解决包裹相位随空间剧烈变化的相位解包裹问题。

本文针对数字全息系统中固有的光学畸变,特别是反射式数字全息中非标准平面照明光和参考光引入的畸变,提出一种从原理上可根本消除各种光场畸变的横向剪切数字全息方法。基本原理是采用三幅物面相互存在微小平移的全息图,通过波前差分来消除照明光和参考光引入的相位畸变,用横向剪切波前重构算法恢复待测物面三维数据。

## 2 物面平移横向剪切数字全息原理及波前重构算法

### 2.1 物面平移横向剪切数字全息原理

物面平移横向剪切数字全息的光路如图 1 所示,入射光经分光棱镜(BS)分成两束,一束入射到反射镜 M 做干涉参考光,一束入射到待测物体做物光,待测物体固定在载物台(OS)上,该载物台可沿  $x$  和  $y$  两个正交方向做横向平移,载物台上的待测物经成像透镜 L 成像到 CCD 面,并且在 CCD 面上物光与参考光发生干涉产生干涉全息图。

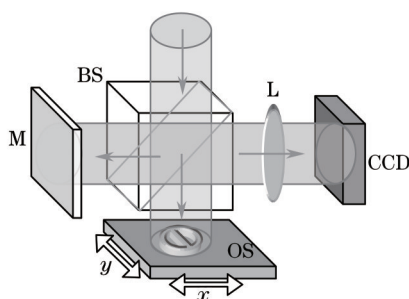


图 1 物面平移横向剪切数字全息光路图

Fig.1 Optical scheme of object translation and lateral shearing digital holography

设入射到待测物体表面的照明光场为  $U_1(x_0, y_0) = A_1 \exp[jw_1(x_0, y_0)]$ , 则经物体表面反射的调制光场为

$$U'_0(x_0, y_0) = A'_1 \exp\{j[w_1(x_0, y_0) + w_0(x_0, y_0)]\}, \quad (1)$$

式中  $A'_1$  是反射光振幅,  $w_1(x_0, y_0)$  是入射光场波前相位,  $w_0(x_0, y_0)$  是待测物体表面波前相位。该携带物体表面信息的反射光经成像透镜 L 后在 CCD 面成像形成物光, 其光场表达式为

$$U_o(x_i, y_i) = A_o \exp\{j[w_1(x_i, y_i) + w_0(x_i, y_i) + \alpha(x_i, y_i)]\}, \quad (2)$$

式中  $A_o$  是光场振幅,  $w_1(x_i, y_i)$ ,  $w_0(x_i, y_i)$ ,  $\alpha(x_i, y_i)$  分别是照明光场、物表面波前和成像透镜在 CCD 面产生的

相位分布,式中忽略了成像缩放比例因子。同理,参考光经成像透镜L变换后在CCD面会产生一个弯曲畸变的光场,设为

$$U_r(x_i, y_i) = A_r \exp[jw_r(x_i, y_i)], \quad (3)$$

式中  $A_r$  是参考光振幅,  $w_r(x_i, y_i)$  是参考光在 CCD 面的波前相位。

物光与参考光叠加产生干涉,干涉条纹被 CCD 记录下来得到数字全息图,其方程为

$$I(x_i, y_i) = |U_o + U_r|^2 = |U_o|^2 + |U_r|^2 + A_r A_o \exp\{j[w_r(x_i, y_i) - w_o(x_i, y_i) - \alpha(x_i, y_i)]\} + A_r A_o \exp\{j[w_o(x_i, y_i) + w_o(x_i, y_i) + \alpha(x_i, y_i) - w_r(x_i, y_i)]\}, \quad (4)$$

显然,全息方程的一、二项为零级衍射分量,三、四项为正负一级衍射分量,在离轴全息条件下,通过滤波可以提取三、四项所对应的衍射光波,若光路中不存在各光学元件引入的光场畸变,则衍射光波的相位就等于待测物表面的相位  $w_o(x_i, y_i)$ 。然而实际光学系统中的各种光场畸变使该相位无法严格等于待测物表面相位。为了消除这些未知的相位畸变,方法是在相同的全息记录条件下,分别记录三幅物面存在相互垂直微小平移的数字全息图,然后通过滤波提取得到三个衍射光场为

$$\begin{cases} T_1 = A_r A_o \exp\{j[w_o(x_i, y_i) + w_o(x_i, y_i) + \alpha(x_i, y_i) - w_r(x_i, y_i)]\} \\ T_2 = A_r A_o \exp\{j[w_o(x_i, y_i) + w_o(x_i - \Delta, y_i) + \alpha(x_i, y_i) - w_r(x_i, y_i)]\}, \\ T_3 = A_r A_o \exp\{j[w_o(x_i, y_i) + w_o(x_i, y_i - \Delta) + \alpha(x_i, y_i) - w_r(x_i, y_i)]\} \end{cases} \quad (5)$$

式中  $\Delta$  是物面的微小平移量。然后将光场相除得到两个有关物表面的横向剪切光场,即

$$\begin{cases} T_x = \frac{T_1}{T_2} = \exp\{j[w_o(x_i, y_i) - w_o(x_i - \Delta, y_i)]\} \\ T_y = \frac{T_1}{T_3} = \exp\{j[w_o(x_i, y_i) - w_o(x_i, y_i - \Delta)]\} \end{cases} \quad (6)$$

显然(6)式中的相位不存在任何光场畸变,分别是物体表面相位沿  $x$  和  $y$  方向剪切后的差分波前,使用横向剪切波前重构算法可精确还原物表面的二维原始波前。

## 2.2 基于傅里叶展开的横向剪切波前重构算法

在横向剪切干涉测量中,已经提出了多种波前重建算法<sup>[19-21]</sup>,从相互垂直方向上的差分波前恢复待测的二维波前,其中基于傅里叶展开的差分波前重建算法<sup>[22]</sup>可用于复杂波面的重建,而且计算过程快速简捷。

从(6)式得到的横向剪切光场中提取相位,并按 CCD 采样规格做离散化,得到待测物表面波前分别沿  $x$  和  $y$  方向的差分波前  $\phi_x$  和  $\phi_y$ , 即

$$\phi_x(m, n) = w_o(m, n) - w_o(m - s, n), \quad (7)$$

$$\phi_y(m, n) = w_o(m, n) - w_o(m, n - s), \quad (8)$$

式中  $m, n = 0, 1, 2, 3, \dots, N - 1$ ,  $s$  是横向剪切量。将  $\phi_x(m, n)$ ,  $\phi_y(m, n)$  作傅里叶展开得

$$\phi_x(m, n) = \sum a_{pq} Z_{pq}(m, n) \left[ 1 - \exp\left(\frac{i2\pi ps}{N}\right) \right], \quad (9)$$

$$\phi_y(m, n) = \sum a_{pq} Z_{pq}(m, n) \left[ 1 - \exp\left(\frac{i2\pi qs}{N}\right) \right], \quad (10)$$

式中  $Z_{pq}(m, n) = \frac{1}{N} \exp\left[\frac{i2\pi}{N}(pm + qn)\right]$ ,  $p, q = 0, 1, 2, \dots, N - 1$ 。显然(9)、(10)式中傅里叶展开系数  $a_{pq}$  是待测物面  $w_o(m, n)$  的傅里叶频谱,依据最小二乘法原理,可推导出

$$a_{pq} = \frac{1}{4[\sin^2(\pi ps/N) + \sin^2(\pi qs/N)]} \times \left\{ \left[ 1 - \exp\left(\frac{i2\pi ps}{N}\right) \right] \cdot \mathcal{F}_{pq}[\phi'_x(m, n)] + \left[ 1 - \exp\left(\frac{i2\pi qs}{N}\right) \right] \cdot \mathcal{F}_{pq}[\phi'_y(m, n)] \right\}, \quad (11)$$

式中  $\phi'_x(m, n)$ ,  $\phi'_y(m, n)$  是实际干涉测量得到的横向剪切差分波前,  $\mathcal{F}_{pq}(\cdot)$  表示二维离散傅里叶变换。最后对傅里叶频谱(11)式作逆傅里叶变换即可得到待测波前相位函数  $w_o(m, n)$ 。

差分波前存在数据维数减少的问题,对此可通过周期延拓的方法予以解决,未知的差分数据可通过下式进行补充:

$$\phi_x(m,n) = -\sum_{p=1}^{N/s-1} \phi_x(m+ps,n), \quad m=0,1,2,\dots,s-1, n=0,1,2,\dots,N-1, \quad (12)$$

$$\phi_y(m,n) = -\sum_{q=1}^{N/s-1} \phi_y(m,n+qs), \quad n=0,1,2,\dots,s-1, m=0,1,2,\dots,N-1. \quad (13)$$

### 3 实 验

设计了一个实验检测光路,光路中人为引进未知的波前畸变进行了实验验证,实验光路如图2所示。该光路是一个典型的反射式数字全息光路,激光经显微物镜(MO)扩束和准直透镜L1准直后被分光棱镜分成两束,一束经反射镜M3反射后作参考光,另一束经待测物体O反射后作物光,两束光再经成像透镜成像在CCD面产生像面数字全息图。实验被测物体是一块微棱镜阵列反光板。为了验证本文方法的抗光场畸变能力,光路中人为加入了两个引起光场弯曲的畸变透镜DL1和DL2,其中DL1使输入的照明光为非标准平面光,DL2使参考光为非标准平面光。

实验系统的基本参数如表1所示。系统中的CCD像素尺寸约为0.005 mm×0.005 mm载物台采用组合式平移台,其平移精度为0.01 mm,每次的平移量为 $\Delta=0.02$  mm,透镜的放大倍率是0.5,因此物面每次平移对应像面会在CCD上平移2 pixel,即横向剪切量 $s=2$ 。

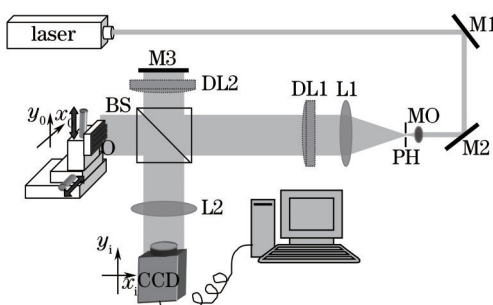


图2 物面平移横向剪切数字全息记录光路图

Fig.2 Recording scheme of object translation and lateral shearing digital holography

表1 实验系统基本参数

Table 1 Parameters of the experimental system

Parameter	Value
Focus length of imaging lens L1	68 mm
Magnification ratio of imaging lens	0.5
Size of CCD	6.47 mm×4.84 mm
Pixels of CCD	1392 pixel×1040 pixel
Moving resolution of objective stage	0.01 mm
Translation distance	0.02 mm

实验结果如图3所示,其中图3(a)是实验测量物体,一块微棱镜阵列反光板,图3(b)是物面未做平移记录下的物体包裹相位,图3(c)是物面沿 $x$ 方向做0.02 mm平移的物体包裹相位,图3(d)是物体沿 $y$ 方向做0.02 mm平移的物体包裹相位。将包裹相位图3(c)和(d)对应的纯相位函数与未做平移的包裹相位图3(b)纯相位函数相除,并提取相位得到两个分别沿 $x$ 和 $y$ 方向剪切的差分相位函数,如图3(e)和(f)所示。最后将这两个剪切相位函数按(12)、(13)式作缺失数据补充,

再代入(11)式作逆傅里叶变换得到待测反射板的表面相位分布如图3(g)所示。从图中可见,通过本文算法待测物体的相位得到了清晰再现,相位包裹已经被完全去除,反射板表面的蜂窝状正六边形网格和内部的三角形棱边都非常清晰,网格内的亮度由正六边形中心向底部边缘逐渐变暗,表示其高度由中心最高处向六边形边缘逐渐下降,从而构成一个正六棱锥,其白色虚线框内的三维图像如图3(h)所示。

为了验证此方法的抗光场畸变能力,对相同畸变光路下拍摄的普通数字全息图3(b)做相位解包裹处理,得到的测量相位如图4(a)所示。从图中可清晰看到反射板表面的蜂窝网格结构,但表面的亮度分布明显不

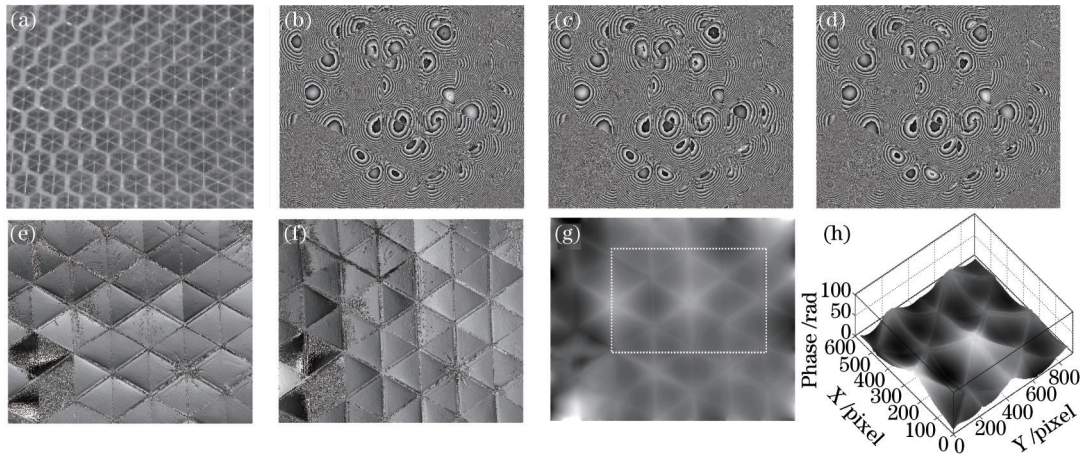


图3 物面平移横向剪切数字全息实验。(a)待测量的微棱镜阵列;(b)无平移数字全息包裹相位;(c)沿 $x$ 方向平移的包裹相位;(d)沿 $y$ 方向平移的包裹相位;(e)包裹相位(c)与(b)的差分相位;(f)包裹相位(d)与(b)的差分相位;(g)横向剪切重构相位;(h)重构相位的三维图

Fig.3 Experimental results of objective translation lateral shearing digital holography. (a) Micro-prisms for test; (b) digital holography wrapped phase without translation; (c) wrapped phase with translation in the  $x$  direction; (d) wrapped phase with translation in the  $y$  direction; (e) phase difference between phase (b) and (c); (f) phase difference between phase (b) and (d); (g) reconstructed phase from the phase differences; (h) 3-D image of the reconstructed phase in the white rectangular region

均匀,从图4(b)给出的虚线框区域的三维图可清晰看出,普通全息测量相位中存在一个类似二次曲面的相位畸变,该畸变是由实验光路中人为引入的两个畸变透镜引起的,由于畸变透镜选用的是曲率半径接近1m的球缺,因此畸变相位接近于一个球面。再对比采用本方法得到测量相位图3(g)和(h)可知,光路中的畸变光场对本方法的测量结果没有影响,测量相位中不存在球面凹陷。

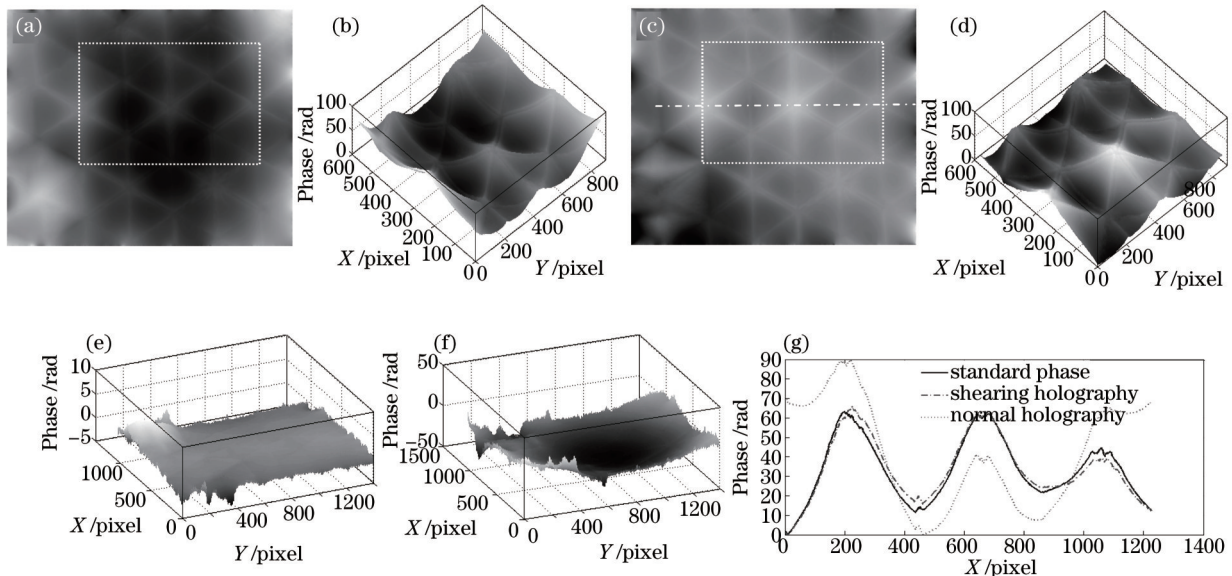


图4 普通全息与无畸变标准全息实验。(a)在相同畸变场下普通数字全息相位解包裹图;(b)带畸变场的相位三维图;(c)没有畸变场的标准数字全息相位解包裹图;(d)标准相位三维图;(e)横向平移数字全息相位与标准相位的偏差图;(f)普通全息相位与标准相位的偏差图;(g)三种相位的剖面对比图

Fig.4 Experimental results of common digital holography and standard holography without phase aberration. (a) Unwrapped phase of common digital holography with the same aberrational optical path; (b) 3-D image of aberrational phase; (c) standard unwrapped phase; (d) 3-D image of standard phase; (e) error distribution between the phases of the proposed method and the standard phase; (f) error distribution between the phases of common holography phase and the standard phase; (g) comparison of three phase profiles

为了进一步验证本方法的测量准确性,将原来光路中的两个畸变透镜DL1和DL2去除,使全息光路的参考光和照明光都是标准的平面波,从而记录一个没有畸变的数字全息图,并做全息再现和相位解包裹处

理,得到图4(c)所示的标准测量相位,图4(d)是其虚线框部分的三维相位图。对测量相位图3(g)和(h),可以看出两个测量相位非常相似。为了进行定量比较,将测量结果图3(g)和图4(a)分别与没有畸变的相位图4(c)相减,得到相位偏差图如图4(e)和(f)所示。其中图4(e)是相位与没有畸变的标准相位的偏差图,其左上角存在一个隆起的凸包,该凸包位置对应相位图左下角的一个正六边形区域,经观察干涉图发现在实验采集时,由于该区域的干涉条纹过于密集出现了欠采样,从而导致该部分数据无效产生过大偏差,因此该部分偏差与本方法无关。再对照图4(e),除了上述无效区域外,其他区域的数据偏差基本是一个平面,其均方差值为0.432 rad。根据 $2\pi$ 相位等同于一个波长 $\lambda$ ,则可推算出测量结果与无畸变测量结果的偏差约为 $\lambda/14$ ,这说明本方法可有效消除畸变光场的影响。图4(f)是受畸变影响的普通全息相位与标准相位的偏差,从图中可见其偏差分布类似于一个球面。同样地,在偏差图左上角,即对应相位图的左下角区域也存在一个因欠采样导致的无效数据区。图4(g)是图4(c)白色点划线位置提取的三条相位剖线对比图,其中实线是无畸变标准相位剖线,点划线是得到的相位剖线,短虚线是普通全息图得到的相位剖线。从图中明显可见,测量相位与无畸变的标准相位高度重合,而普通全息的测量相位在光场畸变的影响下与标准相位产生了大幅度的偏离,从而进一步说明本法不受未知光场畸变的影响。

## 4 结 论

提出了一种可根本消除各种光场畸变的横向剪切数字全息方法,采用三幅物面相互存在微小平移的全息图,通过波前差分来消除照明光和参考光引入的相位畸变,用横向剪切波前重构算法恢复待测物面三维数据。通过数字全息原理构建数学模型对本文方法进行了详细分析,并给出了基于傅里叶展开的横向剪切波前重构算法。分析结果发现针对数字全息系统中固有的光学畸变,特别是反射式数字全息中非标准平面照明光和参考光引入的畸变,方法均可有效消除。设计了一个反射式实验检测光路,光路中人为引进未知的波前畸变对算法进行了实验验证。通过将相同畸变场下的普通全息相位、相位与没有畸变的标准相位做对比,证实了方法的有效性。进一步数据分析显示,在没有对物面和CCD记录面做严格方位校准,横向平移精度为0.01 mm,平移量为0.02 mm的条件下,相位与标准相位的均方根相位偏差为0.432 rad,若将 $2\pi$ 相位看作一个波长 $\lambda$ ,则其误差约为 $\lambda/14$ 。分析其误差来源主要在于三个方面:物面与CCD记录面之间的方位不平行引起的误差;横向平移以及回复位移不准引起的定位误差;因环境振动引起三幅平移全息相位之间的附加误差等。这些误差的具体影响将在以后的研究中做进一步深入讨论。所提方法可方便用于超精密光学三维测量。

## 参 考 文 献

- 1 Cuhe E, Bevilacqua F, Depeursinge C. Digital holography for quantitative phase-contrast imaging[J]. *Opt Lett*, 1999, 24(5): 291-293.
- 2 Marquet P, Rappaz B, Magistretti J, *et al.*. Digital holographic microscopy: a noninvasive contrast imaging technique allowing quantitative visualization of living cells with subwavelength axial accuracy[J]. *Opt Lett*, 2005, 30(5): 468-470.
- 3 Carl D, Kemper B, Wernicke G, *et al.*. Parameter-optimized digital holographic microscope for high-resolution living-cell analysis[J]. *Appl Opt*, 2004, 43(36): 6536-6544.
- 4 Pietro F, Simonetta G, Domenico A, *et al.*. Extended focused image in microscopy by digital holography[J]. *Opt Express*, 2005, 13(18): 6738-6749.
- 5 Wang Yawei, Lei Haina, Bu Min, *et al.*. Distribution characteristics and identification of several typical blood cells under optical phase models[J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(10): 2629-2635.  
王亚伟, 雷海娜, 卜敏, 等. 几种典型血细胞的光学相位模型及其分布特征与识别方法[J]. *中国激光*, 2009, 36(10): 2629-2635.
- 6 Murata S, Yasuda M. Potential of digital holography in particle measurement[J]. *Opt & Laser Technol*, 2000, 32(8): 567-574.
- 7 Coppola G, Ferraro P, Iodice M, *et al.*. A digital holographic microscope for complete characterization of microelectromechanical systems[J]. *Meas Sci & Technol*, 2004, 15(3): 529-539.
- 8 Wang X, Zhao D, Jing F, *et al.*. Information synthesis (complex amplitude addition and subtraction) and encryption with digital holography and virtual optics[J]. *Opt Express*, 2006, 14(4): 1476-1486.
- 9 Pan Weiqing, Zhao Xiaobo. Measurement of steel ball surface flaw based on dual wavelength interferometry and digital phase detection[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(5): 0508007.

- 潘卫清, 赵晓波. 钢球表面缺陷的双波长干涉数字相位检测[J]. 中国激光, 2014, 41(5): 0508007.
- 10 Massig J H. Digital off-axis holography with a synthetic aperture[J]. Opt Lett, 2001, 27(24): 2179-2181.
- 11 Ferraro P, Nicola S De, Finizio A, *et al.*. Compensation of the inherent wave front curvature in digital holographic coherent microscopy for quantitative phase-contrast imaging[J]. Appl Opt, 2003, 42(11): 1938-1946.
- 12 Di Jianglei, Zhao Jianlin, Fan Qi, *et al.*. Phase correction of wavefront reconstruction in digital holographic microscopy[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(1): 56-61.
- 邱江磊, 赵建林, 范琦, 等. 数字全息显微术中重建物场波前的相位校正[J]. 光学学报, 2008, 28(1): 56-61.
- 13 Montfort F, Charrière F, Colomb T, *et al.*. Purely numerical compensation for microscope objective phase curvature in digital holographic microscopy: influence of digital phase mask position[J]. J Opt Soc Am A, 2006, 23(11): 2944-2953.
- 14 Colomb T, Cuche E, Charrière F, *et al.*. Automatic procedure for aberration compensation in digital holographic microscopy and applications to specimen shape compensation[J]. Appl Opt, 2006, 45(5): 851-863.
- 15 Colomb T, Kühn J, Charrière F, *et al.*. Total aberrations compensation in digital holographic microscopy with a reference conjugated hologram[J]. Opt Express, 2006, 14(10): 4300-4306.
- 16 Pan Weiqing, Zhu Yongjian, Lang Haitao. Phase-contrast imaging technology with digital holographic microscope based system calibration[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(7): 1812-1820.
- 潘卫清, 朱勇建, 郎海涛. 基于系统标定的相衬显微数字全息方法[J]. 中国激光, 2010, 37(7): 1812-1820.
- 17 Ferraro P, Alfieri D, Nicola S De, *et al.*. Combining lateral shear interferometry with digital holography for quantitative phase microscopy[C]. SPIE, 2006, 6341: 634115.
- 18 Qian Xiaofan, Li Bin, Li Xinghua, *et al.*. Improvement of least-square phase unwrapping algorithm based on lateral shearing interferometry[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(11): 1109002.
- 钱晓凡, 李斌, 李兴华, 等. 横向剪切最小二乘相位解包裹算法的改进[J]. 中国激光, 2012, 39(11): 1109002.
- 19 Fried D L. Least-squares fitting a wavefront distortion estimate to an array of phase-difference measurements[J]. J Opt Soc Am, 1977, 67(3): 370-375.
- 20 Harbers G, Kunst P J, Leibbrandt G W R. Analysis of lateral shearing interferograms by use of Zernike polynomials[J]. Appl Opt, 1996, 35(31): 6162-6172.
- 21 Elster C. Exact two-dimensional wave-front reconstruction from lateral shearing interferograms with large shears[J]. Appl Opt, 2000, 39(29): 5353-5359.
- 22 Freischlad K R, Koliopoulos C L. Modal estimation of wave front from difference measurements using the discrete Fourier transform[J]. J Opt Soc Am A, 1986, 3(11): 1852-1861.

栏目编辑: 何卓铭