

# 一种离轴数字全息显微相位自动补偿方法

马树军, 刘炜华, 周鹏飞

(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:** 在离轴数字全息显微技术中, 离轴光路往往在数字参考光重建过程中导致倾斜的相位畸变, 严重影响重建质量. 采用一种畸变相位自动补偿的方法, 对数字全息重建过程进行研究. 通过对全息图的频域图进行处理, 找到+1级像和零级像所成角度的对应关系, 利用多像素坐标计算, 得到相应的倾斜数字参考光. 利用倾斜的数字参考光进行数字重建, 再通过对重建相位图进行二值化处理, 利用最大连通区域判定找到最佳补偿相位, 实现相位的自动补偿. 实验证明方法效果较好, 能实现自动消除一次相位畸变的功能.

**关 键 词:** 离轴; 数字全息显微; 相位补偿; 连通区域

**中图分类号:** O 436      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-3026(2019)06-0847-05

## Off-Axis Digital Holographic Microscopic Phase Automatic Compensation Method

MA Shu-jun, LIU Wei-hua, ZHOU Peng-fei

(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.

Corresponding author: MA Shu-jun, E-mail: mashujun@me.neu.edu.cn)

**Abstract:** In the off-axis digital holographic microscopy, off-axis optical paths tend to cause tilted phase distortion during the digital reference light reconstruction, which seriously affects the quality of the reconstruction. A method of automatic distortion compensation is proposed to study the digital holographic reconstruction process. By processing the frequency domain of the hologram, the corresponding relationship between the angle of the first term and the DC term is found, and the multi-pixel coordinate calculation is used to obtain the corresponding tilted digital reference light. The digital reconstruction is performed using the tilted digital reference light, then the reconstructed phase is binarized, and the optimal compensation phase is found using the maximum connected region to realize the automatic phase compensation. The experiment proves that this method is effective and can realize the automatically eliminating tilt phase distortion.

**Key words:** off-axis; digital holographic microscopy; phase compensation; connected area

数字全息测量技术是一种强大的无损观测工具, 主要应用于 MEMS 器件表面形貌观测、位移测量、应力应变测量、流体测量、生物检测等领域<sup>[1-6]</sup>. 数字全息显微镜相比于传统的透射电子显微镜、扫描电子显微镜、普通光学显微镜、原子力显微镜(AFM)<sup>[7]</sup>等, 有成本低、分辨率高、三维成像、非接触式测量等优势. 数字全息实现的过程是先通过物光和参考光干涉, 用 CCD 采集全息图, 再利用菲涅尔近似法<sup>[8]</sup>、卷积法<sup>[9]</sup>、角谱法<sup>[10]</sup>

等方法对全息图进行重建处理, 再对重建的相位图进行解包裹处理, 得到重建的三维图像. 通常最快速有效的实验方法是采集单幅全息图, 再通过计算机模拟数字参考光来重建三维图. 但重建得到的相位图通常存在很大的一次倾斜相位畸变, 如果直接对此畸变相位进行三维重建则会得到大倾斜的畸变三维图像, 这时需要对此畸变进行处理. 产生这种畸变相位的原因是在数字重建过程中使用了数字平面参考光, 而在实际实验操作过

收稿日期: 2018-04-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51505076); 辽宁省自然科学基金资助项目(2015020105); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N180304016, N140304010); 辽宁省高等学校创新团队项目(LT2014006).

作者简介: 马树军(1982-), 男, 河北保定人, 东北大学副教授.

程中采用的是离轴全息的方法,物光和参考光是成一定角度的,即参考光相对于物光是倾斜的.这就需要数字重建时采用倾斜的参考光,消除一次倾斜畸变相位.现有的补偿方法主要是利用平面拟合方法对相位进行补偿,但如果被测样品本身的高度信息非对称性较大,则会导致补偿失效明显.本文提出一种通过最大连通区域的方法进行自动相位补偿,即在重建计算时直接引入倾斜的参考光.这种补偿方法比重建计算后利用平面拟合方法得到的重建形貌更精确,鲁棒性更强.

1 方 法

使用离轴数字全息时,物光与参考光形成一定夹角  $\theta$ . 为了能使 +1 级、零级、-1 级像更易分离,所成夹角  $\theta$  应满足  $\theta > \arcsin(3B\lambda)^{[8]}$ .  $B$  为物光相对于 CCD 带宽,  $\lambda$  为波长. 频域图各区域见图 1. 图中左上角实线圆形区域表示需要进行进一步处理、重建的区域,中间虚线大圆形区域为零级像所在区域,右下角虚线小圆形区域为共轭像.  $(f_{x0}, f_{y0})$  是零级像形心位置. 通过寻找三个区域中灰度值最大的像素点来确定各自区域的精确位置,方便频域滤波,为接下来的计算确定了参考像素坐标.

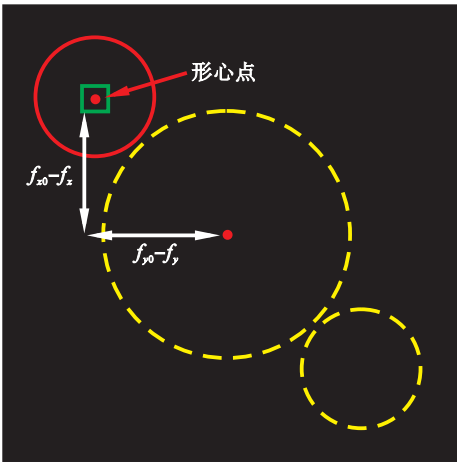


图 1 离轴数字全息频域图  
Fig. 1 Spectrum of an off-axis hologram

通常情况下采用倾斜的参考光来实现一次相位畸变的补偿<sup>[9]</sup>,倾斜的参考光表示为

$$R(x,y)=\exp\left[i\frac{2\pi}{\alpha}(\sin\theta_x+\sin\theta_y)\right].\tag{1}$$

这里的  $\theta_x, \theta_y$  是由图 1 计算得来. 首先将得到的数字全息图进行傅里叶变换,得到频域图. 再从频域图中的 +1 级像、零级像和 -1 级像中筛选找到 +1 级像区域中最亮的像素,并得到其坐标,

如图 1 实线圆圆点位置. 再选取其最亮点附近像素  $(f_x, f_y)$ . 本文以其最亮点像素为中心,分别取其上下左右适当像素数量的区域,如图 1 所示矩形区域. 对像素坐标  $(f_x, f_y)$  与零级像形心坐标  $(f_{x0}, f_{y0})$  利用式(2)和式(3)进行运算,分别得到各对像素点对应的  $\theta_x, \theta_y$  的计算公式:

$$\theta_x=\sin^{-1}\left((f_{x0}-f_x)\cdot\lambda/(M\Delta x)\right),\tag{2}$$

$$\theta_y=\sin^{-1}\left((f_{y0}-f_y)\cdot\lambda/(N\Delta y)\right).\tag{3}$$

式中:  $\lambda$  为激光波长;  $M$  为 CCD 横向像素点数量;  $N$  为 CCD 纵向像素点数量;  $\Delta x$  为 CCD 每个像素点的横向长度;  $\Delta y$  为 CCD 每个像素点的纵向长度. 得到  $\theta_x, \theta_y$  之后,利用式(1)计算出对应倾斜数字参考光的表达式,将其代入重建公式中得到对应的重建相位图,本文采用的重建算法为角谱法.

$$U(x_0,y_0)=\text{FFT}^{-1}\left\{\text{FFT}[H(x,y)R(x,y)]g(\xi,\eta)\right\}.\tag{4}$$

式中: FFT 为快速傅里叶变换;  $H(x,y)$  为 CCD 记录的数字全息图;  $g(\xi,\eta)$  为脉冲响应函数:

$$g(\xi,\eta)=\exp\left[j\frac{2\pi d}{\lambda}\sqrt{1-(\lambda\xi)^2-(\lambda\eta)^2}\right].\tag{5}$$

式中  $d$  为重建距离,重建振幅为

$$A(x_0,y_0)=|U(x_0,y_0)|.\tag{6}$$

重建相位为

$$\varphi(x_0,y_0)=\arctan\frac{\text{Im}(U(x_0,y_0))}{\text{Re}(U(x_0,y_0))}.\tag{7}$$

再从这些相位图中挑选出相位拟合最佳的相位图. 为了挑选出最佳相位图,这里先对相位图进行二值化处理,通过反复实验总结的经验,采用的二值化阈值为 0.9,再找到每张相位图的最大连通区域. 处理完所有像素后,找出最大连通区域值最大的相位图,即为最佳畸变补偿相位图. 再通过最小二乘法解包裹得到重建的三维图像. 流程图如图 2 所示.

最大连通区域通常有两种判断方法:4 邻域连通和 8 邻域连通判别,如图 3 所示. 这里采用 4 邻域连通来判断计算连通区域,并记录各个连通区域的大小. 以中心像素为起点,上、下、左、右 4 个像素连通则判断为连通,而左上、左下、右上、右下连通不视为连通. 找到各连通区域后标记各连通区域及其包含的像素点个数,即找出最大连通区域. 通过比较各个相位图的最大连通区域,从中挑选最大连通区域值最大的相位图即为最佳补偿相位图.

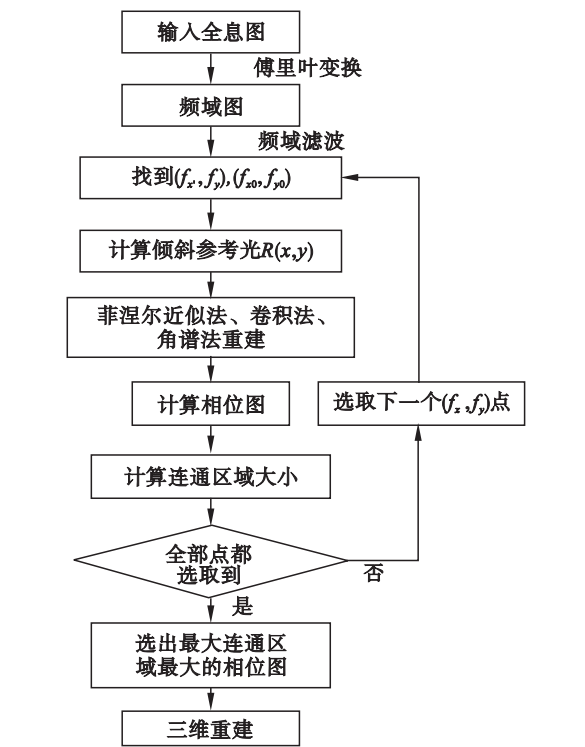


图 2 流程图  
Fig.2 Flowchart

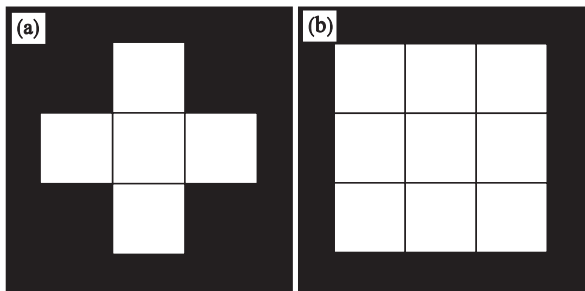


图 3 最大连通区域判别方法  
Fig.3 Detection methods for the maximum connected region  
(a)—4 邻域连通; (b)—8 邻域连通.

2 实 验

离轴数字显微全息实验光路原理如图 4 所示.

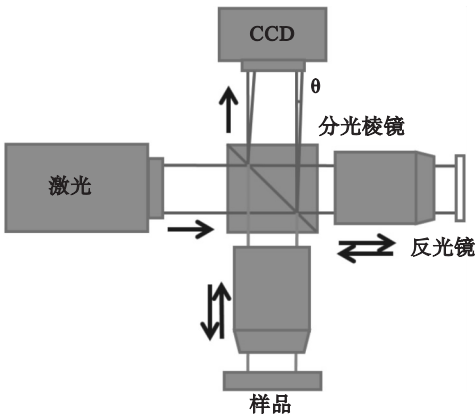


图 4 实验光路原理图  
Fig.4 Schematic of experimental optical path

激光从左侧射入,如果激光束太细,需通过扩束镜将激光束扩大到合适直径. 到达分光棱镜时将光束分为互相垂直的两束光. 一条光路通过物镜打到样品上反射回 CCD 作为物光,另一束光穿过一个相同的物镜打到反光镜上反射回来,再通过分光棱镜反射到 CCD 作为参考光. 通过调节参考光反光镜的反光角度,使物光和参考光之间形成一定的离轴夹角  $\theta$ ,形成离轴干涉全息. 本实验采用的实验装置如图 5 所示.

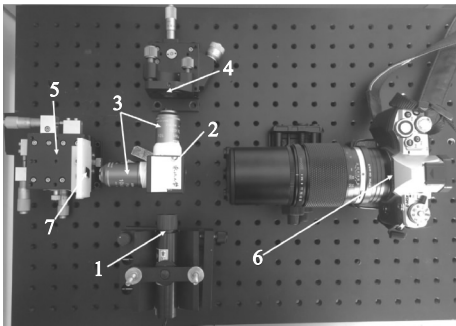


图 5 实验装置  
Fig.5 Experimental device

1—激光; 2—分光棱镜; 3—尼康 MRL00102 CFIPan Achromat 10X 无限远物镜, NA = 0.25; 4—反光镜; 5—xyz 微位移平台; 6—CCD 为 OLYMPUS E - M5 Mark 相机; 7—MEMS 样品.

MEMS 样品(图 6)由 Mariusz Martyniuk 博士提供,利用等离子体增强化学气相沉积 (PECVD)  $\text{SiN}_x$  制得<sup>[10]</sup>,为长 400  $\mu\text{m}$ ,宽 200  $\mu\text{m}$  的矩形方块. 实验记录的全息图如图 7 所示.



图 6 实验观测的 MEMS 样品  
Fig.6 Experimentally observed MEMS sample

3 结果与讨论

选取不同位置像素点下经过计算补偿的相位图如图 8 所示. 由图可知,此过程是一个渐变的过程,参考光的倾斜角度越接近真实的物光和参考光夹角,对应的相位图条纹越稀疏. 因此可以通过最大连通区域判定法进行相位补偿,但由于有时重建的干扰相位图条纹过于密集,甚至有时候条纹错位、断开,则选择适当的二值化阈值就十分重

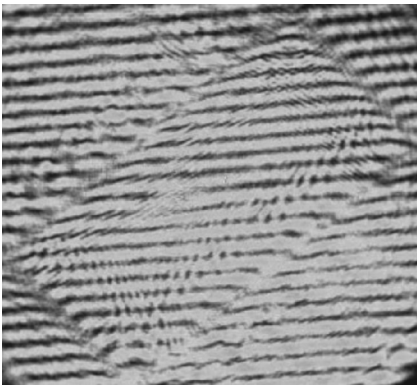


图 7 全息图  
Fig.7 Hologram

要. 过低的阈值可能会使一些干扰相位图中不同条纹因为错位等原因被判定为同一连通区域. 而过大的阈值则易使最佳相位图判定连通区域过小. 经过反复实验, 本实验选取的二值化阈值为 0.9.

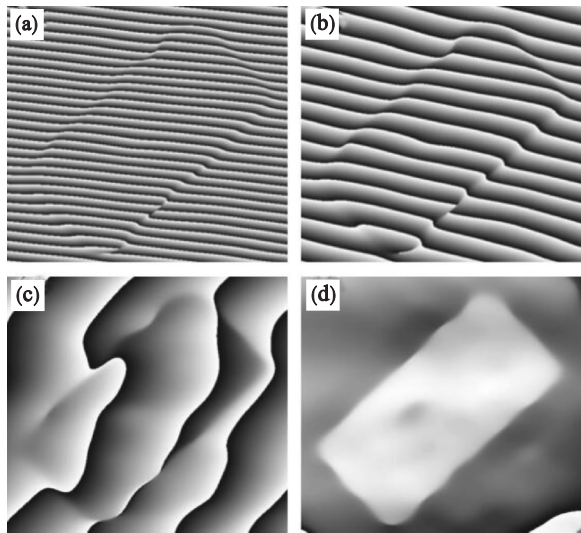


图 8 不同像素坐标计算补偿的相位图  
Fig.8 The calculated compensated phase at different pixel positions  
(a),(b),(c)—像素坐标计算的补偿相位;  
(d)—最佳补偿相位.

由图 8 可以明显看到不同像素坐标下计算出的倾斜数字参考光对相位补偿产生的影响. 数字参考光的倾斜角越接近实验中物光参考光夹角, 相位图中条纹间距越大, 补偿效果越好.

得到多幅相位图后, 需要通过算法挑选出最佳补偿相位图. 图 9 为计算得到的各自连通区域像, 像素数分别为 64,1 481,9 155,24 702, 可以明显看出, 条纹越稀疏, 连通区域的面积越大. 当达到最佳补偿位置时, 对应相位图二值化后具有最大的连通区域面积, 并且数值差别明显. 以此作为一次相位补偿的判据十分可靠.

得到相位图后, 利用最小二乘法解包裹得到的三维重建结构如图 10 所示. 由图 10a 可以看出, 未补偿相位图由于倾斜相位的存在使重建图像发生严重变形. 而经过相位拟合后重建图则能反映出物体的真实形貌. 不过因为此实验过程中环境存在一定的振动, 导致图像在高度方向有一定失真, 此处有待改进.

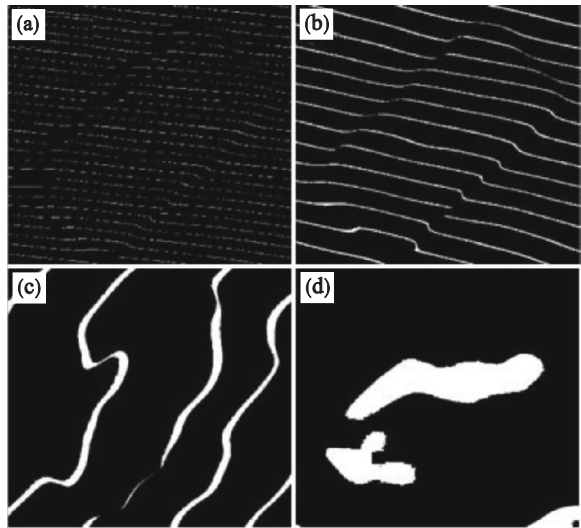


图 9 (a) 到 (d) 分别为图 8 对应的二值化图  
Fig.9 (a) to (d) the binarized images corresponding to Fig.8

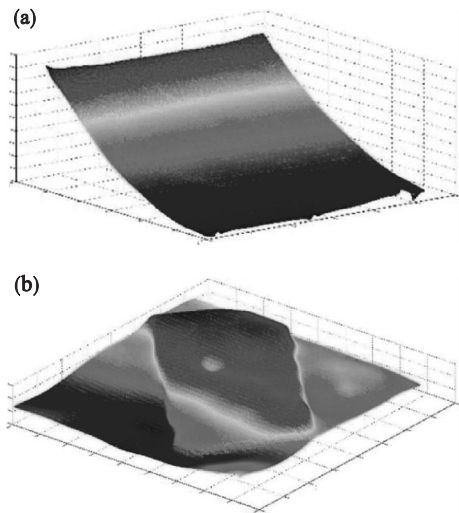


图 10 三维重建结构  
Fig.10 3D reconstruction  
(a)—未补偿重建图; (b)—补偿重建图.

4 结 语

本文采用的相位补偿有较高的鲁棒性, 对畸变相位补偿效果很好. 需要注意的是: 离轴程度对此方法有一定影响, 离轴度越高, 用此方法得到的



补偿相位图补偿的质量越好,也更利于零级像和共轭像的分离.不过,由于实际实验很难保证严格意义上的平面波,也可能导致重建效果不理想.总体来说此方法能很好解决一次相位补偿问题.

参考文献：

[ 1 ] Katz J, Sheng J. Applications of holography in fluid mechanics and particle dynamics[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*,2010,42(1):531 – 555.

[ 2 ] Majeed H, Sridharan S, Mir M, et al. Quantitative phase imaging for medical diagnosis[J]. *Journal of Biophotonics*, 2017,10(2):177 – 205.

[ 3 ] Marquet P,Depeursinge C, Magistretti P J. Exploring neural cell dynamics with digital holographic microscopy [ J ]. *Annual Review of Biomedical Engineering*, 2013, 15 ( 1 ): 407 – 431.

[ 4 ] Fukui K I, Namai Y, Iwasawa Y. Imaging of surface oxygen atoms and their defect structures on CeO<sub>2</sub> ( 1 1 1 ) by noncontact atomic force microscopy [ J ]. *Applied Surface Science*,2002,188(3/4):252 – 256.

[ 5 ] Zhou W J, Peng J, Yu Y J. Deformation measurement via

digital holography [ J ]. *Optics & Precision Engineering*, 2005,13( z1 ):46 – 51.

[ 6 ] Palacios F, Ricardo J, Palacios D, et al. 3D image reconstruction of transparent microscopic objects using digital holography[ J ]. *Optics Communications*,2005,248(1/2/3):41 – 50.

[ 7 ] Mann C J, Kim M K. Quantitative phase-contrast microscopy by angular spectrum digital holography[ C ]//Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. San Jose,2006:60900B-1-60900B-8.

[ 8 ] 钟丽云,张以谟,吕晓旭,等.数字全息中的一些基本问题分析[J]. *光学学报*,2004,24(4):465 – 471.  
( Zhong Li-yun, Zhang Yi-mo, Lyu Xiao-xu, et al. Analysis of some fundamental issue about digital hologram [ J ]. *Acta Optica Sinica*,2004,24(4):465 – 471. )

[ 9 ] Cuche E, Marquet P, Depeursinge C. Simultaneous amplitude-contrast and quantitative phase-contrast microscopy by numerical reconstruction of Fresnel off-axis holograms [ J ]. *Applied Optics*,1999,38(34):6994 – 7001.

[ 10 ] Martyniuk M. Low-temperature micro-opto-electro-mechanical technologies for temperature sensitive substrates [ D ]. Perth; University of Western Australia,2006.