

基于参考物镜的数字全息显微相位畸变自动补偿

马树军, 周鹏飞, 刘炜华

(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 建立了参考物镜与数值拟合相结合的方法, 对离轴数字全息显微系统的相位畸变进行补偿. 因为物镜带来的光波曲率差异, 预放大数字全息显微系统往往产生附加相位因子. 在参考光路中引入相同参考物镜, 利用物理方法初步消除因为曲率问题带来的相位畸变. 参考物镜加入以后, 相位畸变主要来自三个方面. 衍射计算时使用数字模拟平面参考光, 离轴结构存在空间角, 产生一次相位畸变; 实际记录到的全息图, 参考物镜实验误差导致了残余二次相位畸变; 光路中其他光学元件形成像差, 无法获取正确的微结构三维形貌. 数值上通过多项式对整个相位表面作曲面拟合, 利用相位表面与该拟合曲面的差值, 提取样品真实相位分布. 只用一幅全息图, 经过一次多项式拟合便实现了多次相位畸变的自动补偿. 以 USAF 分辨率板作为微结构样品作形貌测量, 验证了该方法的准确有效.

关 键 词: 离轴; 数字全息; 显微; 参考物镜; 多项式拟合; 畸变补偿

中图分类号: O 436 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2019)08-1144-06

Automatic Compensation of Digital Holographic Microscopic Phase Distortion Based on the Reference Objective

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

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

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

Abstract: The method of combining reference objective and numerical fitting is established to solve the phase distortion of off-axis digital holography. Because of the optical curvature difference caused by the objective, the pre-amplified digital holographic microscopy system often produces additional phase factors. By introducing the same reference objective in the reference beam path, the phase distortion due to curvature problems is initially eliminated. With the addition of the reference objective, phase distortion mainly comes from three aspects: the numerical simulation of plane reference light is used in diffraction calculation, and a phase distortion is generated with the off-axis structure having a spatial angle; the actually recorded hologram causes a secondary phase distortion because the object wave passes through the pre-amplified objective; the other optical components in the optical path form aberrations, failing to get the correct 3D shape of the microstructure. The entire phase surface is fitted by a polynomial, and the difference between the phase surface and the fitted surface is used to extract the true phase distribution of the sample. With only one hologram, multiple phase distortions are automatically compensated by a polynomial fit. The USAF resolution plate being used as the microstructure pattern for measurement, the accuracy and effectiveness of the method are verified.

Key words: off-axis; digital holography; microscopic; reference objective; polynomial fitting; distortion compensation

电子耦合器件(CCD)的问世, 实现了全息图 记录与重建过程的数字化, 数字全息显微技术取

得了飞速发展^[1]. 数字全息显微技术作为一种强大的无损检测工具, 具有非接触、大景深、实时、对样品无导电性要求等优点, 广泛用于 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^[2-8].

数字全息系统按照参考光与物光到达 CCD 是否具有空间角度分为同轴和离轴两种光路. 离轴数字全息系统只需单张全息图, 实像、直透光、共轭像频谱可以快速分离, 容易实现即时形貌重建^[9]. 但因为空间离轴角度的存在, 数值模拟的垂直参考光在重建时带来倾斜, 引入一次相位畸变. 离轴数字全息显微系统多为预放大成像光路, 由于加入显微物镜, 产生附加相位因子, 会引入二次相位畸变. 光路中其他光学元件形成初级像差. 这些相位畸变带来的定量相位信息远远大于样本本身的相位值, 结果是无意义的. 因此相位畸变问题成为数字全息显微系统的关键^[10-11].

相位畸变补偿常用物理校正和数值补偿来实现. 物理方法上, Coppola 等利用参考全息图相位相减的方法, 在样品平整区域拍摄全息图作为参考全息图, 但是这种方法需要两次曝光拍摄两幅全息图, 并且要求被测对象存在无样本信息区域^[12]. Qu 等改变样品到物镜的距离和反射镜的位置来调整中和球面相位^[13], 采用光纤激光加电子可调透镜的方法实现球面相位补偿^[14]. 后两种物理校正二次相位畸变措施, 因为调节精度的问题, 往往都会有残余二次相位畸变^[15]. 数值方面, Nguyen 等采用 21 项 Zernike 多项式曲面拟合相位补偿^[16]. Trujillo 等通过实像中心与直透光中心相对位置计算参考光, 从而做出相应补偿^[10]. 单纯的数值补偿方法需要大量的计算, 并且过于依赖数值拟合, 结果的真实性下降. 本文提出一种用参考物镜初步调整球面相位畸变, 结合多项式曲面拟合消除一次相位畸变及残余二次相位畸变的方法.

1 全息图的记录及重建

1.1 数字全息图记录

数字全息术通过使用电子设备 (例如 CCD) 来记录数字化的全息图, 然后用计算机进行数值重建. 在这个过程中, 光波的振幅和相位都来自一个共同照射的物体. 因此, 数字全息术需要依赖实验设备和软件共同实现. 一幅数字全息图是由干涉产生的. 也就是说, 一个来自物体的未知波前, 称为物波 $O(x, y)$:

$$O(x, y) = A_o(x, y) \exp[i\varphi_o(x, y)]. \quad (1)$$

式中: x 和 y 表示空间域内, 全息记录平面的坐标; $A_o(x, y)$ 表示物光振幅分布; $\varphi_o(x, y)$ 表示物光相位分布. 添加参考光波 $R(x, y)$:

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

其中 λ 为记录光波长, θ_x 和 θ_y 表示空间角度.

得到由两个波的相位调制的光强. 干涉图的强度 $I_H(x, y)$ 可以表示为

$$I_H(x, y) = |O + R|^2 = |O|^2 + |R|^2 + RO^* + R^*O. \quad (3)$$

这里的 RO^* 和 R^*O 是干涉交叉项, O^* 和 R^* 表示物光波和参考光波的共轭.

数字全息图的重建是通过一个数字参考光波 $C(x, y)$ 照明, 取 $C(x, y) = R(x, y)$, 重建光场的复振幅可以表示为

$$Q(x, y) = I(x, y)C(x, y) = (|O|^2 + |R|^2)R(x, y) + O(x, y)|R|^2 + R(x, y)R(x, y)O(x, y)^*. \quad (4)$$

式中第一项为直透光或者零级像; 第二项为 +1 级项或者原始像, 其包含物光的原始信息; 第三项是畸变了的共轭像, 也称为 -1 级项. 当满足频谱分离条件时, 第二项 $O(x, y)|R|^2$ 便可以在频域内被提取.

1.2 数字重建方法

离轴数字全息重建通常采用菲涅尔近似法、卷积法和角谱法^[17-19]. 三种重建方法均可运用快速傅里叶计算, 分别使用一次、三次、两次傅里叶运算. 角谱法 (angular spectrum algorithm, ASA) 是利用衍射角谱理论数值再现物光场的方法, 用到两次快速傅里叶运算, 对重建距离无严格要求, 限制条件较少. 本文采用角谱法对全息图进行重建.

$$G_A(x', y') = \text{IFFT} \left\{ \text{FFT} [Q(x, y)] \times \left\{ \exp \left\{ j d \frac{2\pi}{\lambda} [1 - (\lambda f_x)^2 - (\lambda f_y)^2]^{\frac{1}{2}} \right\} \right\} \right\}. \quad (5)$$

式中: f_x 和 f_y 表示空间频率分量; $x' - y'$ 为像平面; FFT 表示快速傅里叶计算; IFFT 表示逆傅里叶计算. 取式 (4) 中等式右边第二项 $Q_o(x, y) = O(x, y)|R|^2$, 作离散傅里叶计算:

$$G_A(m\Delta x', n\Delta y') = \text{IFFT} \left\{ \text{FFT} [Q_o(m\Delta x, n\Delta y)] \times W_s(m\Delta \xi, n\Delta \eta) \right\}, \quad (6)$$

$$W_s(m\Delta \xi, n\Delta \eta) = \exp \left\{ j d \frac{2\pi}{\lambda} [1 - (\lambda m\Delta \xi)^2 - (\lambda n\Delta \eta)^2]^{\frac{1}{2}} \right\}. \quad (7)$$

式中: $\Delta x'$ 和 $\Delta y'$ 表示空域内像平面采样间隔; Δx 和 Δy 表示空域内全息平面采样间隔; $\Delta \xi$ 和 $\Delta \eta$ 表示空间频率采样间隔; $W_s(m\Delta \xi, n\Delta \eta)$ 也被称为频域内光学传递函数; m 和 n 是整数 ($-M/2 \leq m \leq M/2, -N/2 \leq n \leq N/2, M \times N$ 是 CCD 像素数). 这时, 再现像的振幅和相位分别表示为

$$A(m\Delta x', n\Delta y') = |G_A(m\Delta x', n\Delta y')|, \quad (8)$$
$$\varphi(m\Delta x', n\Delta y') = \arctan \frac{\text{Im}(G_A(m\Delta x', n\Delta y'))}{\text{Re}(G_A(m\Delta x', n\Delta y'))}. \quad (9)$$

Im, Re 分别表示取实部和虚部. 反正切函数解出的相位取值在 $[-\pi, \pi]$ 之间, 与真实相位有 2π 的整数倍的差值, 需要相位解包裹, 来还原真实相位. 可以通过最小范数法和路径法来解析相位.

因为物光垂直照射在样品上, 因此物体高度信息与真实相位有如下关系:

$$Z_D = \frac{\lambda \varphi_o}{4\pi}. \quad (10)$$

式中: Z_D 表示物体上任意一点 D 相对于参考点的高度值; φ_o 表示相位解包裹后, D 点相对于参考点的真实相位值.

2 多项式表面拟合相位畸变补偿

相位畸变主要包括两部分: 离轴结构带来一次相位畸变; 表现为倾斜相位畸变; 物镜引入二次相位畸变, 表现为球面相位畸变. 另外, 其他光学元件带来的初级像差也对相位有部分影响. 虽然参考物镜消除了大部分二次相位畸变, 但受到实验精度影响, 还是会有残余二次相位畸变; 另外在解包裹过程中受到噪声和残差传递的影响也会有相位误差. 本文考虑解包裹过程带来的误差, 将畸变补偿步骤置于解包裹之后, 通过多项式表面拟合的方法一次性解决. 相位畸变分布具有缓慢连续的特点, 往往在全局存在, 是一个大范围变化的低频信息. 样本形貌边缘相位变化较快, 属于高空空间频率, 可以认为是叠加在整个相位畸变上的扰动. 曲面拟合是拟合低频信息而保留高频信息. CCD 记录的全息图由被测样本的真实相位信息和相位畸变因子组成:

$$\varphi_{\text{sam}}(x, y) = \varphi_H(x, y) - \varphi_{\text{fit}}(x, y). \quad (11)$$

式中: $\varphi_{\text{sam}}(x, y)$ 是样本真实相位; $\varphi_H(x, y)$ 是重构的展开总相位; $\varphi_{\text{fit}}(x, y)$ 是总相位的拟合. 总相位拟合结果 $\varphi_{\text{fit}}(x, y)$ 可以表示为一个曲面, 由多项式表示:

$$\varphi_{\text{fit}}(x, y) = \sum_{i=1}^n A_i P_i. \quad (12)$$

式中: P_i 是第 i 个多项式; A_i 是第 i 个多项式系数. 拟合多项式阶数越大, 拟合效果越好, 但计算效率也会随之降低. 基于之前参考物镜的调节, 大部分二次相位畸变得以消除, 为相位畸变数值补偿提供了便利. 实验证明, 只需要六项多项式便可以得到很好的拟合相位畸变补偿:

$$\varphi_{\text{fit}}(x, y) = A_1 + A_2 x + A_3 y + A_4 xy + A_5 x^2 + A_6 y^2. \quad (13)$$

3 实验验证

3.1 参考物镜离轴数字全息显微光路

离轴数字全息显微实验光路原理如图 1 所示.

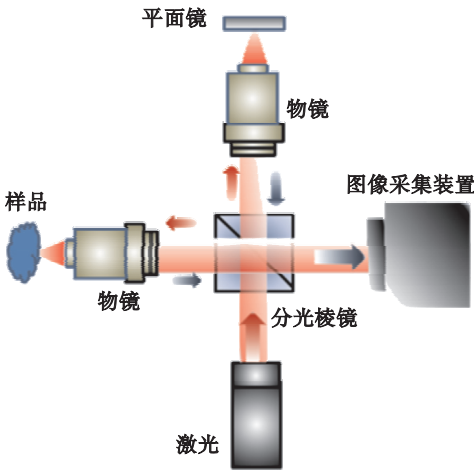


图 1 实验光路原理图
Fig. 1 Schematic of experimental optical path

该光路基于迈克尔逊干涉仪结构. 从激光器射出的激光到达分光棱镜时被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至 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 θ , 形成离轴干涉全息. 实验首先调节物光端, 通过 xyz 位移精调平台调整样品位置, 找到目标区域, 使样品在 CCD 成像清晰. 实验装置如图 2 所示.

改变参考平面镜的位置, 在参考物镜的调制作用下, 使参考光波的曲率与物光波基本相同. 具体表现为干涉条纹由一系列同心圆环变为等距离平行条纹, 如图 3、图 4 所示. 反光镜存在某一位置, 可使参考光波曲率与物光波曲率相等, 在这个位置前后, 干涉条纹均表现为一一系列同心圆环. 实验无法达到使两者曲率完全相同的精度, 因此还需要后期的数值补偿.

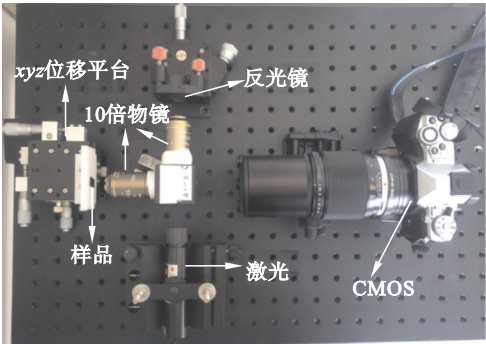


图 2 实验装置
Fig. 2 Experimental device



图 3 曲率相差较大干涉图
Fig. 3 Interferogram with a large curvature difference

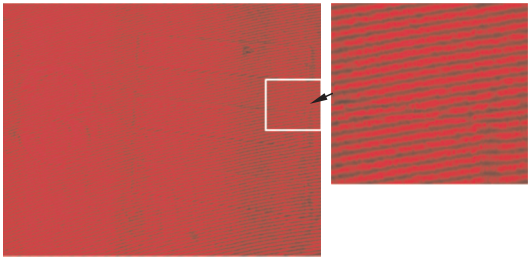


图 4 经参考物镜调制后的干涉图
Fig. 4 Interferogram after modulation by a reference objective

3.2 实验结果与讨论

实验样品采用玻璃基底、表面为 100 nm 高的铬层的 USAF 分辨率测试板,其光学显微图像如图 5 所示. 分辨率板本身有横向尺寸信息,还可以对系统的横向精度作标定. 分辨率板的玻璃表面是透明的,因此没有足够的反射光作为绘制图案的背景参考,为此采用蒸镀工艺在其表面镀上一层均匀铝膜. 分辨率板分正片、负片,对应的镀层绘制图案是凸起、凹下. 实验观察区域为分辨率板的正片 5 组 1 号和 2 号线.

三维形貌重建流程如图 6 所示.

图 7 为分辨率板目标区域全息图. 该区域是 5 组 1 号及 2 号线,可以看出,条纹在肉眼观察下是均匀直条纹,说明参考物镜的调制解决了大部分二次相位畸变.

图 8a 是解包裹以后得到的相位图. 该相位图存在一次相位畸变带来的倾斜和参考物镜调节后残余的二次相位畸变,同时还有部分初级像差. 图 8b 是对解包裹后的相位全区拟合,反映了系统相位畸变的形状. 未补偿相位减去全区相位拟合结果,得到高频样本相位.

图 9 是根据相位与物体高度的关系得到的三维形貌图. 表 1 是图 8b 所示拟合曲面所用项及其对应系数,该多项式同时完成了平移、倾斜、像散、离焦像差补偿. 实验结果证明,使用该六项多项式拟合结果较好. 如图 9 所示,测量目标区域铬层图案高度约 95 nm,与样品规格(100 nm)相符;系统横向尺寸使用微分尺作标定,而 USAF 分辨率板 5 组 2 号的线宽度约 14 μm,与重建结果的横向尺寸吻合.

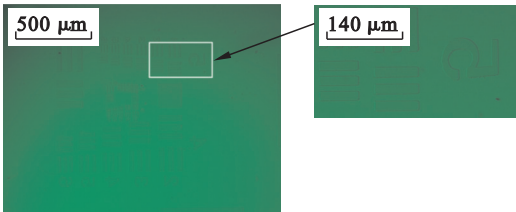


图 5 分辨率测试板及其放大的目标区域
Fig. 5 Resolution test board and its enlarged target area

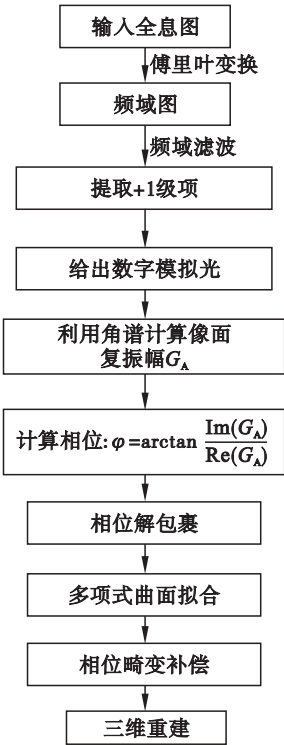


图 6 三维形貌重建流程图
Fig. 6 Flow chart of three-dimensional profile reconstruction

表 1 拟合项及对应系数

Table 1 Items for fitting and corresponding coefficients

P_i	A_i
1	4.80
x	-0.000 006 1
y	-0.000 016
xy	-0.000 003 1
x^2	0.013
y^2	0.030



图 7 分辨率板区域全息图
Fig. 7 Resolution board area hologram

4 结 语

本文提出了一种物理与数值结合的相位畸变补偿方法. 实验光路基于迈克尔逊干涉仪结构, 加入光学器件较少, 实验抗干扰能力提高. 该方法只需要一次曝光形成一张全息图; 参考物镜提高了数值计算的效率, 增加了拟合结果的真实性; 对高频样本信息扰动进行全区域拟合补偿, 一次性处理了一次倾斜相位畸变、残留二次相位畸变的问题, 对初级像差带来的相位也进行了补偿. 实验结果表明, 该方法重建的三维形貌在横向尺寸和纵向高度上都有很好的精度.

参考文献:

[1] Michalkiewicz A, Kujawska M, Stasiewicz K. Digital holographic camera and data processing for remote monitoring and measurement of mechanical parts[J]. *Opto-Electronics Review*,2008,16(1):68 – 75.

[2] Schnars U. Direct phase determination in hologram interferometry with use of digitally recorded holograms[J]. *Journal of the Optical Society of America A*,1994,11(7):2011 – 2015.

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

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

[5] Moon I, Yi F, Javidi B. Automated three-dimensional microbial sensing and recognition using digital holography and statistical sampling [J]. *Sensors*,2010,10(9):8437 – 8451.

[6] 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.

[7] Popescu G. Quantitative phase imaging of nanoscale cell structure and dynamics[J]. *Methods in Cell Biology*,2008,90:87 – 115.

[8] Merola F,Memmo P,Miccio L, et al. Tomographic flow cytometry by digital holography [J]. *Light Science & Applications*,2017,6(4):e16241.

(下转第 1171 页)

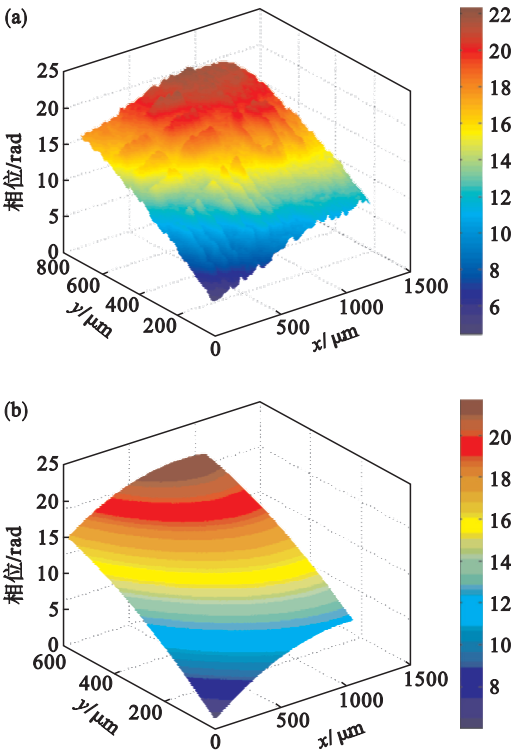


图 8 未补偿的相位图及拟合相位曲面
Fig. 8 Uncompensated phase diagram and fitted phase surface
(a)—相位图; (b)—拟合曲面.

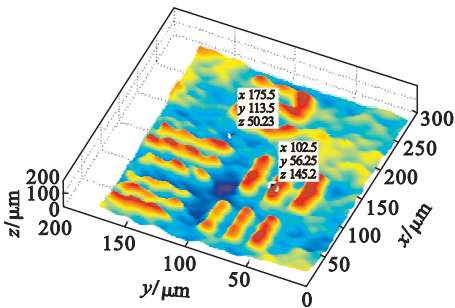


图 9 相位拟合补偿后的三维形貌图
Fig. 9 Three-dimensional profile after phase fitting compensation