

文章编号: 2095-2163(2023)03-0250-05

中图分类号: O438.1

文献标志码: A

快速数字全息显微畸变补偿

谢展, 黄欣宇, 蔡朋, 范圆圆, 刘从蕊, 孔勇

(上海工程技术大学 电子电气工程学院, 上海 201620)

摘要: 在数字全息显微定量相位成像的过程中, 实验装置中使用显微镜放大物光信息和参考光的光束, 这种全息图的三维相位会引入显微镜的曲率造成物体相位的严重失真。此外, 离轴的倾角会引入倾斜畸变。本文提出了用双波长相位相减的方法来消除数字全息显微中的畸变, 具体的操作是用对 671 nm 波段高透而对 532 nm 波段高反的滤波片来分别记录不同波长下的相位图, 然后将含有物体信息和畸变的相位图与只含有畸变的相位图直接相减就可以得到畸变补偿后的相位图。通过理论分析和实验验证证实了所提出的方法对补偿数字全息显微中的畸变有较大的应用价值。

关键词: 数字全息; 畸变; 滤波片; 双波长

Digital holographic microscopy aberration compensation with high speed

XIE Zhan, HUANG Xinyu, CAI Peng, FAN Yuanyuan, LIU Congrui, KONG Yong

(School of Electronic and Electrical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

[Abstract] In the process of digital holographic microscopic quantitative phase imaging, a microscope is used in the experimental device to enlarge the object light information and the reference light beam. The three-dimensional phase of the hologram will introduce the curvature of the microscope and cause serious distortion of the object phase. In addition, off-axis inclination introduces tilted distortion. In this paper, a two-wavelength phase subtraction method is proposed to eliminate the distortion in digital holographic microscopy. The specific operation is to record the phase images at different wavelengths by using filters that are highly transparent to 671 nm band and highly inverse to 532 nm band respectively. Then, the phase diagram containing object information and distortion can be directly subtracted from the phase diagram containing only distortion to obtain the phase diagram with distortion compensation. Through theoretical analysis and experimental verification, it is proved that the proposed method has great application value to compensate distortion in digital holographic microscopy.

[Key words] digital holography; aberration; filter piece; dual wavelength

0 引言

数字全息术实验中采用高度相干的激光器作为光源, 光学装置中利用了傅里叶透镜、分光器、显微镜以及其他光学器件作为光束调制的工具。通过分光器的光束被分割为 2 束光。一束照射物体携带物体信息, 为物光波前, 一束不携带任何信息作为参考波前, 2 束光波相互干涉最终通过光敏半导体器件记录光波信息, 即全息图。但是, 由于数字全息使用多个透镜以及显微镜等光学器件, 其固有的畸变问题一直是全息技术的研究重点。光学器件会引入其他的畸变, 如显微镜会引入曲率畸变或二次畸变。二次畸变只与成像透镜分焦距和放大倍率有关, 与记录距离、物参夹角等因素无关^[1-3]。全息畸变会对物体相位成像造成严重的失真, 因此一直是数字

全息研究中的不可避免的问题。对于畸变的消除问题, 大体上可分为 2 种: 数值方法和结构装置的方法。对此拟做分析表述如下。

(1) 数值法。就是通过一些数字的操作, 利用图像处理的算法工具在计算机上对全息图、频谱图、重建图进行处理可以补偿相位畸变。数值法的操作空间较大, 计算机的普及以及人工智能算法的飞速发展使得图像处理算法更加多样。而将数字全息应用到信号中进行分析, 又可以采用许多数学方法进行操作。Colomb 等人^[4]首次提出了参考共轭全息图, 得到了很好的畸变补偿相位图。Ferraro 等人^[5]首次将横向剪切的方法应用到数字全息显微中, 记录了 X 方向和 Y 方向的 2 幅全息图并恢复出相位信息, 有效地移除了显微镜的畸变。横向剪切的方法一直由后来的学者们不断加以改进, 用于补偿显微

基金项目: 上海市自然科学基金(19ZR1421700)。

作者简介: 谢展(1996-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 数字全息研究; 孔勇(1977-), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向: 光纤传感及数字全息方面研究。

通讯作者: 孔勇 Email: kky757@aliyun.com

收稿日期: 2022-06-06

镜产生的畸变。Pan 等人^[6]采取横向剪切的方法,获取了3幅相移全息图,利用相位差恢复相位图,移除了完整的相位畸变。

(2)结构装置法。就是通过光学器件的调制将物光和参考光中的畸变消除或者抵消,以此来补偿全息畸变。2009年,Zhou 等人^[7]提出数字全息显微预防大系统,将物光和参考光的曲率调制成相同并在干涉时相互抵消了畸变。曾亚楠等人^[8]在参考光中引入参考透镜,通过手动调节透镜的位置改变曲率补偿畸变。但这种方法为手动调节,会有较大误差,没有机械装置的稳定性好。近年来有学者研究显微镜的特性,将显微镜汇聚焦点中间的共焦部分用于物光照射,此部分的畸变较小,因此可以得到畸变较小的相位成像^[9-10]。

本文首次使用双波长相位相减的方法来消除数字全息显微中的畸变,具体的操作是用对671 nm波段高透、而对532 nm波段高反的滤波片来分别记录不同波长下的相位图,而后将含有物体信息和畸变的相位图与只含有畸变的相位图直接相减就可以得到畸变补偿后的相位图。操作简单方便,无需耗时的程序调试。

1 理论研究

数字全息显微利用相干光照射物体形成物光场 $O(x,y)$,并引入一束无物体的参考光场 $R(x,y)$,使2束光发生相干,形成的干涉条纹记录在CMOS上,其总光强可以写为:

$$I_{H(x,y)} = |O(x,y) + R(x,y)|^2 = OO^* + RR^* + OR^* + O^*R \quad (1)$$

其中,“*”表示共轭。式(1)的前2项为零级像,后2项分别为+1级像和-1级像。

在计算机里输入记录的全息图,利用全息衍射再现原理重建图像,用参考光的共轭光恢复图像,则全息图再现的光为:

$$U_c(x,y) = C(x,y)I(x,y) = COO^* + CRR^* + OR^* + O^*R \quad (2)$$

其中, COR^* 中含有物体的波前信息。但是离轴数字全息术在记录物体时,物光和参考光存在一定的夹角,从而使得物体 ±1 级像与0级像在频域上发生了分离。重建图像时,采用参考光照射物体时,会引起再现物体相位加载在一倾斜面上。这种相位偏移误差称为一阶畸变,其数学计算公式如下:

$$\psi_1 = \exp [j(a_1x + b_1y)] \quad (3)$$

其中, a_1, b_1 为 x, y 方向上的因子,只与物光和

参考光的夹角有关。分析式(3)可知,一阶畸变是在对物体的 x, y 方向产生一个倾斜的扰动,因此一阶畸变会造成物体相位的倾斜。图1即为物光照射物体后正向传播示意图。由图1可知,物光在经过显微镜的放大后变成球面波,球面波的曲率跟显微镜的镜面曲率有关。物体信息包含在物光信息中,物光是载波,经过显微镜后被整形放大为向后扩散的球面波,显微镜曲率越大造成的畸变就越大,因此会产生物体相位的严重失真。这种由显微镜造成的物体信息失真称为二阶畸变。二阶畸变的表达式见式(4):

$$\psi_2 = \exp [j(a_2x^2 + b_2y^2)] \quad (4)$$

其中, a_2, b_2 分别为球面相位的系数,与显微镜的放大倍率以及焦距有关。

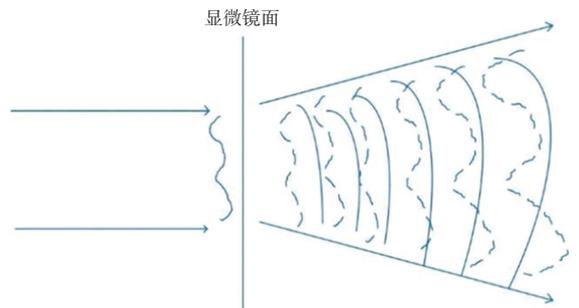


图1 二阶畸变原理图

Fig. 1 Schematic of second-order distortion aberration

基于以上的分析,本文提出了用滤波片来消除一阶和二阶畸变,采用较薄滤波片来代替分束镜,这样可以解决当物镜的工作距离不够长时、尺寸较大的分光棱镜无法放置在物体和物镜之间进行物光和参考光合束去除二级畸变的问题。并且操作简单方便,只需把2个波长恢复出来的解包裹相位图直接相减,就可得到补偿后的相位图。本文选用的滤波片是对671nm波段高透、而对532 nm波段高反的滤波片。滤波片结构图见图2。

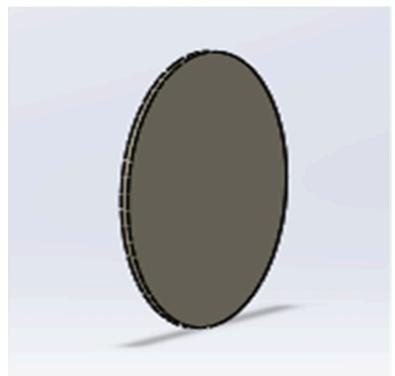


图2 滤波片结构图

Fig. 2 Structure diagram of the filter piece

2 实验方案设计及结果分析

2.1 实验结果

实验采用离轴光路,其结构光路设计如图3所示。其中,光源是由长春新产业公司(CNI)生产的671 nm 红光激光器和532 nm 绿光激光器,其相干距离分别为70 cm和50 cm,很显然绿光激光器的相干度远远超过了红光激光器。ND为光学旋转渐变片,用于调节参考光光强。MO1、L1和MO2、L2是2个扩束准直模块,物镜规格分别为40×和20×,其数值孔径(NA)分别为0.6和0.4。BS1和BS4分别是分束和合束镜。BS2和BS3是半反半透的镜子。Sample是用来拍摄的物体为USAF1951光学分辨率板。具体的光束流向如下:红光激光器发出的入射光经分束镜BS1分成2束,一束入射到反射镜M1做物光,再经过滤波片、MO1放大、L1准直;另一束经过M2反射,并通过MO2放大、L2准直后做参考光,物光和参考光一起在合束镜BS4上合束,在CMOS上发生干涉。绿光激光器发出的光在BS2上分束,一束经过反射镜M2后再通过MO2、L2做参考光,另一束经过BS3、L1、MO1、滤波片,此时滤波片将物体信息全部反射掉了,后续会经过MO1、L1、BS3做物光,接下来物光和参考光在BS4上合束,再次在CMOS上发生干涉。

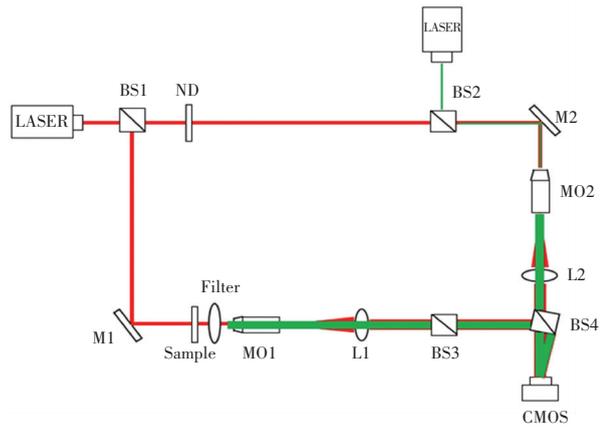


图3 光路结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of optical path structure

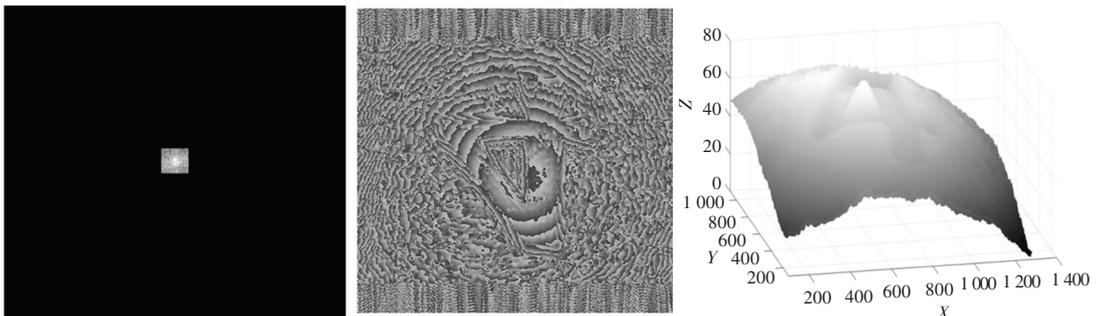
首先,用波长为671 nm的激光器拍摄标定板的全息图作为原始全息图;对原始全息图进行傅里叶变换处理得到原始包裹相位 φ_1 ,此时 φ_1 中不仅包含物体信息,并且同时存在一阶和二阶相位畸变。然后,用波长为532 nm的激光器拍摄的全息图作为空载全息图;对空载全息图进行傅里叶变换处理得到空载包裹相位 φ_2 ,此时 φ_2 中只有一阶和二阶相位畸变。最后,将原始解包裹相位 φ_1 减去空载解包裹相位 φ_2 ,进行相位误差的同时补偿并得到最终相位 φ_3 。波长为671 nm激光器拍摄结果如图4所示,波长为532 nm激光器拍摄结果如图5所示。



(a) 全息图

(b) 重建图

(c) 频谱图



(d) +1级空间滤波频谱图

(e) 包裹相位

(f) 最小二乘解包裹相位

图4 波长为671 nm激光器拍摄结果图

Fig. 4 Photos taken by a 671 nm laser

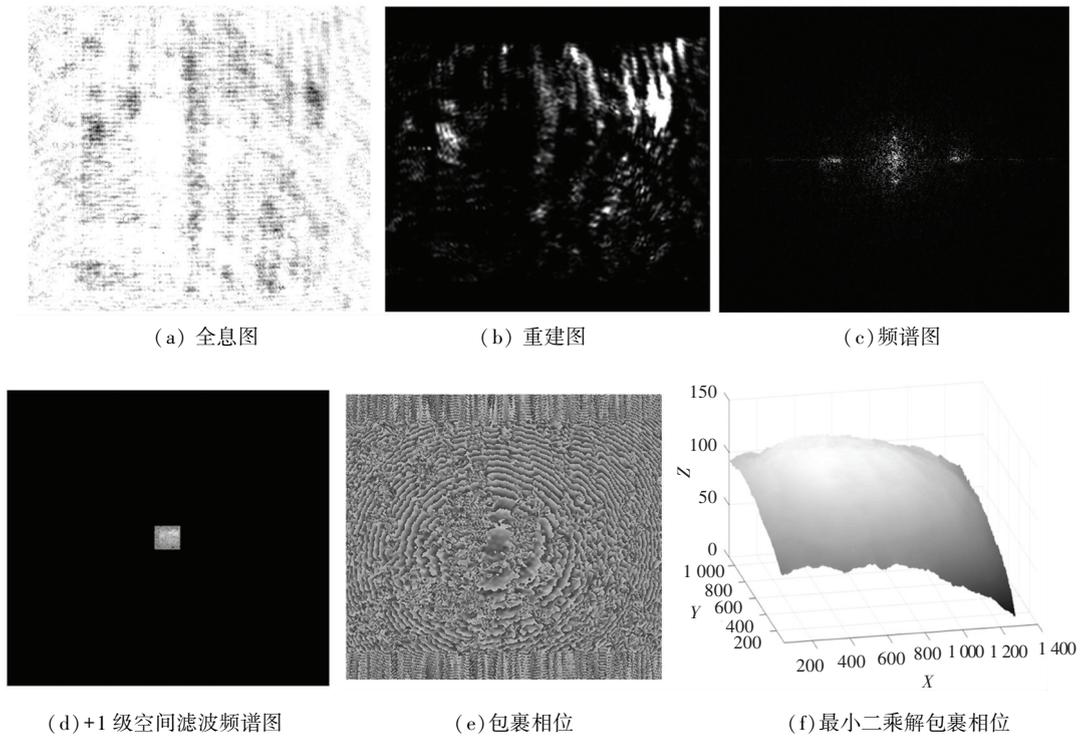


图 5 波长为 532 nm 激光器拍摄结果图

Fig. 5 Photos taken by a 532 nm laser

从图 4(f) 中可以很明显的看出, 由于一阶和二阶畸变的存在使得拍摄的物体严重变形, 而图 5(f) 中仅仅只含有畸变, 将 2 幅图相减后得到的畸变补偿后的相位图, 如图 6 所示。此时则清楚地显现出来了物体信息。

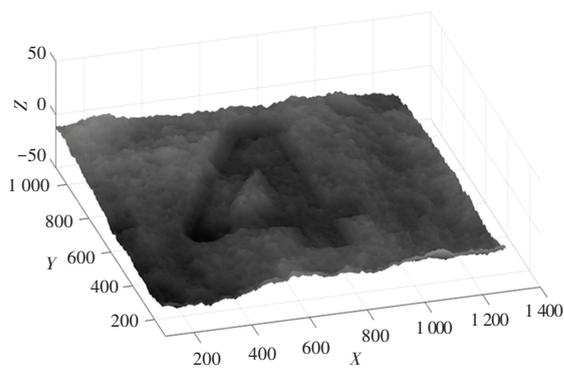


图 6 畸变补偿后的相位图

Fig. 6 Phase diagram with aberration compensation

2.2 仿真实验结果分析

(1) 相比传统的数值去畸变的方式, 本文采用的方式响应速度更快, 与传统的物光和参考光中同时加入性能指标相同的物镜、物光中加入可调谐焦距透镜相比, 本文提出的系统具有结构紧凑和成本较低的优点。

(2) 对于不同波长的激光经过物镜后会产生色

差, 从而导致放大倍数不同和成像面位置的不同, 实验系统中采用消色差的物镜来解决这个问题。本次实验采用的是角谱再现方式, 可实现再现物体尺寸与波长无关的特点, 这样保证了文中采用双波长解包裹的相位信息可以做直接相减的处理。

(3) 实验中, 采用了黑白 CMOS, 双波长相位的拍摄和恢复是分开进行的, 下一步的研究中将采用彩色 CMOS, 同时将双波长的相位信息成像在 COMS 相机上, 对于双波长去畸变的方式单步进行, 从而进一步提高系统的响应时间。

(4) 利用本次研究前期开发的全息图频率域物光选取的技术, 联合双波长解包裹的方式和本文的双波长去畸变方式, 接下来将开展整个系统实时三维检测微观物体的研究。

3 结束语

本文首次提出双波长的方法来消除一阶和二阶畸变, 仅仅只需将不同波长的相位图直接相减就可以得到畸变补偿的相位图。与以往的装置法不同, 方法对于工作距离不够长的物镜非常适用, 可以在显微物镜的前面放置滤波片来代替分束镜和反射镜, 操作方便。仅仅只需滤波片就可以用双波长进

(下转封三)