

基于双 CCD 的单曝光倒频谱相移同轴数字全息技术

郎海涛¹ 潘云² 潘卫清^{3*} 朱勇建³

¹北京化工大学理学院, 北京 100029
²南京航空航天大学金城学院实验中心, 江苏 南京 211156
³浙江科技学院理学院, 浙江 杭州 310023

摘要 受目前电荷耦合器件(CCD)性能的限制,在数字全息技术中通常采用同轴数字全息记录光路来充分利用 CCD 的采样空间,以提高数字全息的测量性能,然而同轴数字全息存在再现像与直透光场及其共轭像重叠的问题。为实现同轴数字全息的实时高分辨记录测量,在单步相移倒频谱技术的基础上提出了基于双 CCD 的单曝光倒频谱相移同轴数字全息技术,并给出了该技术中两个 CCD 镜像重叠位置调节标定的方法和实现两个 CCD 并行 $\pi/2$ 相移的光路结构方案这两个关键技术。实验结果表明基于双 CCD 的单曝光倒频谱相移同轴数字全息技术有效解决了再现像与直透光场及其共轭像分离的问题,初步实现了同轴数字全息的实时记录和再现。

关键词 全息;信息光学;数字全息;单曝光;相移;倒频谱

中图分类号 O438 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.s209010

Single-Exposure Cepstrum Phase-Shifting In-Line Digital Holography Based on Dual-CCD

Lang Haitao¹ Pan Yun² Pan Weiqing³ Zhu Yongjian³

¹ School of Science, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China

² Experiment Center of Jincheng College, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 211156, China

³ Department of Physics, Zhejiang Science and Technology University, Hangzhou, Zhejiang 310023, China

Abstract Limited by the property of charge-coupled device (CCD), the recording optical path of in-line digital holography is commonly used to take full advantage of the CCD sampling space, which is in order to improve the performance of digital holographic measurement. But the reconstructed image of in-line digital holography is overlapped by the direct wave and the conjugate image, which is hard to be separated. To achieve the real-time high-resolution measurement of in-line digital holography, the dual-CCD single-exposure cepstrum phase-shifting in-line digital holography is put forward, which is based on the single phase-shifting cepstrum technology. Then two key technical schemes of this technology, including the method of adjusting dual-CCD's mirroring overlapping position and the optical structure of dual-CCD single-exposure $\pi/2$ phase-shifting, are given. Finally, the experimental results show that, the dual-CCD single-exposure cepstrum phase-shifting in-line digital holography can solve the overlapping problem well. Moreover, the real-time recording and reconstruction of in-line digital holography are initially realized.

Key words holography; information optics; digital holography; single-exposure; phase-shifting; cepstrum

OCIS codes 090.1995; 090.2880; 100.6890

收稿日期: 2012-05-20; **收到修改稿日期**: 2012-07-06

基金项目: 国家自然科学基金(60803063)、浙江省科技计划(2010C31095)和浙江科技学院学科交叉预研重点项目(F703108A01)资助课题。

作者简介: 郎海涛(1978—),男,博士,副教授,主要从事信息光学和计算机视觉等方面的研究。

E-mail: langht@mail.buct.edu.cn

* **通信联系人**。E-mail: pan_weiqing@163.com

1 引 言

数字全息技术^[1,2]是一种融合了现代数字处理技术和传统光学全息技术的新兴相干成像技术。数字全息技术的突出优点是可以简单的硬件系统,利用光的干涉现象获取被测物体波前的复振幅^[3],从而实现对物体的非接触、无预处理的三维立体成像和测量。因此,该技术已广泛应用于显微观测、三维形貌识别^[4]、粒子场测量^[5]、微电子机械和微光学分析^[6,7]、微生物相衬显微成像^[8]、振动形变测量与信息加密^[9]等,所涉及的应用领域包括光学、生命科学、微电子、微光机电系统和材料科学等。现阶段数字全息技术的研究主要集中于实验方法的优化、再现算法的研究、再现像分辨率和精度的提高等方面。

与传统光学全息技术使用的全息干板等记录介质所不同的是,数字全息技术是利用光敏电子成像器件[如电荷耦合器件(CCD)、互补金属氧化物半导体(CMOS)等]来直接记录和存储数字全息图。这里 CCD 的作用就如一个装载信息的容器,其信息容量的大小决定了全息图所能记录的最大信息量,因此决定了数字全息技术的最终性能。然而由于现有 CCD 制造技术的限制,现有 CCD 的光敏面积仍比较小、像素尺寸仍比较大(约 $1.75 \mu\text{m}$),为了提高数字全息技术测量的分辨率和精度,在记录数字全息图时必须充分利用 CCD 的采样空间。而在数字全息技术中,如果采用同轴数字全息记录光路,由于其物光和参考光的入射夹角很小,因此可以通过缩短记录距离来充分利用 CCD 的采样空间,提高再现像的分辨率。CCD 的利用效率高于离轴数字全息。缺点是再现像会受到直透光场和共轭像的干扰^[10,11],需要用相移技术^[12]来解决再现像的分离问题。但若要进行动态测量,需要克服多幅相移数字全息图的同时记录问题,目前常用复用技术(如空分复用^[13~15]、偏振复用^[16]等)来完成并行相移数字全息记录。然而基于单个 CCD 的同轴数字全息实现并行相移,技术难度非常大,现有的两种解决方案均基于不同像素同时探测不同相移量的复用原理,再现像的分辨率和清晰度仍然受 CCD 信息记录能力不足的限制。因此为了从根本上解决这一问题,有必要进行双 CCD 或多个 CCD 数字全息记录及处理

技术的研究,采用双 CCD 联合记录,除了可以解决单个 CCD 信息记录能力不足的问题外,还能增加数字全息记录与处理的自由度,从而可以记录更丰富更全面的信息。

本文在结合前人研究的基础上提出了基于双 CCD 的单曝光相移同轴数字全息技术来实现同轴数字全息的实时高分辨记录测量。简要介绍了基于倒频谱技术的单步相移同轴数字全息图像融合再现算法;针对双 CCD 单曝光相移同轴数字全息记录光路作了详细介绍,重点分析了记录光路中双 CCD 镜像重叠位置的调节标定方法和实现双 CCD 并行 $\pi/2$ 相移的光路设计方案;并且通过实验验证了基于双 CCD 的单曝光倒频谱相移同轴数字全息技术的可行性,初步实现了同轴数字全息的实时记录和再现。

2 单步相移倒频谱再现算法原理

双 CCD 单曝光相移同轴数字全息技术采用两个 CCD 联合记录的方式,有效解决了单个 CCD 信息记录能力不足的限制和并行相移这一技术难题。但该技术采用两个 CCD,只能同时记录两幅相移全息图,无法用常规的四步相移重构算法来恢复物光波前。下面介绍一种基于倒频谱技术的单步相移同轴数字全息信息融合再现算法,其基本原理是在双 CCD 记录光路的其中一个 CCD 光路中放置 $\lambda/4$ 波片,使该 CCD 记录得到一幅有 $\pi/2$ 相移的全息图,而另一个 CCD 记录得到未发生相移的全息图,利用这两幅相移全息图结合倒频谱算法来重构出物光的波前^[17]。

为方便讨论,假设在一维的情况下,未放置 $\lambda/4$ 波片的 CCD 上记录得到的全息图的强度分布可表示为

$$I_1(x) = [O(x) + R(x)][O(x) + R(x)]^* = \{O(x) + R \exp[j(\pi/\lambda d)x^2]\} \times \{O(x) + R \exp[j(\pi/\lambda d)x^2]\}^*, \quad (1)$$

式中 $O(x)$ 和 $R(x)$ 分别是一维情况下的物光和参考光,“*”表示共轭, R 为参考光的振幅值, d 为球面参考光的曲率半径, x 是 CCD 记录面上的空间坐标。对(1)式两边同时除以事先测得的参考光的强度 R^2 ,当物光的强度相对于参考光的强度较弱时,根据泰勒幂级数近似可得

$$\frac{I_1(x)}{R^2} \approx \exp\left\{\frac{O(x)\exp[-j(\pi/\lambda d)x^2] + O^*(x)\exp[j(\pi/\lambda d)x^2]}{R}\right\}, \quad (2)$$

其近似误差来自于 $|O(x)|^2/2R^2$, 当物光强度与参考光的强度比值小于 0.1 的时候, 近似误差将小于 0.5% ^[18]。对(2)式取对数运算, 就能得到物光复振幅的实部为

$$\lg \frac{I_1(x)}{R^2} = \frac{2}{R} \operatorname{Re}\{O(x)\exp[-j(\pi/\lambda d)x^2]\}, \quad (3)$$

同理, 光路中放置 $\lambda/4$ 波片的 CCD 上记录得到的全息图发生了 $\pi/2$ 的相移, 那么经过非线性对数滤波后就能得到物光复振幅的虚部, 即

$$\lg \frac{I_2(x)}{R^2} = \frac{2}{R} \operatorname{Im}\{O(x)\exp[-j(\pi/\lambda d)x^2]\}, \quad (4)$$

联立复振幅的实部(3)式和虚部(4)式就得到经球面波函数 $\exp[-j(\pi/\lambda d)x^2]$ 调制后物光的复振幅, 即

$$O(x)\exp[-j(\pi/\lambda d)x^2] = \lg \frac{I_1(x)}{R^2} + j \lg \frac{I_2(x)}{R^2}, \quad (5)$$

对(5)式进行卷积再现即能得到无直透光场和共轭像的清晰再现像。

3 双 CCD 单曝光相移同轴数值全息记录装置

图 1 为双 CCD 单曝光相移同轴数字全息记录光路示意图, 在本文实验中采用的是透射式同轴数字全息记录光路, 图中 BS 为分束器, M1 和 M2 为平面反射镜。下面重点分析该记录装置中双 CCD 镜像重叠位置的调节标定和如何实现双 CCD 并行 $\pi/2$ 相移这两个关键技术。

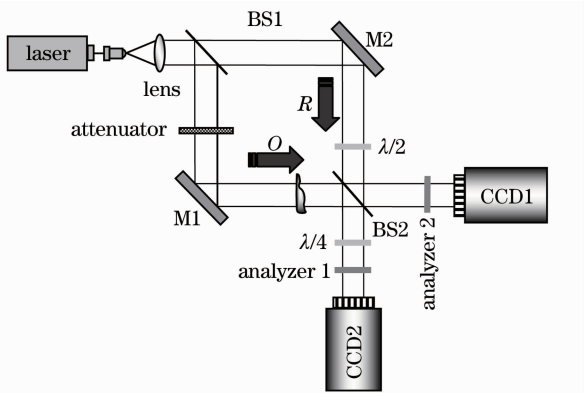


图 1 双 CCD 单曝光相移同轴数字全息记录光路示意图

Fig. 1 Recording configuration of dual-CCD single-exposure phase-shifting in-line digital holography

3.1 双 CCD 镜像重叠位置的调节与标定

双 CCD 数字全息技术的数字全息图的记录是由两个 CCD 联合记录完成的, 由于不同 CCD 在做数字全息记录和预处理时都以各自记录面上的坐标

系为参考坐标系, 而在不采用高精定位装置的情况下, 各 CCD 间的相对位置关系是未知的, 为了将不同坐标系下的信息变换到公共坐标系下进行融合, 需要通过一定的数字处理来确定这些坐标系或 CCD 记录面之间的相对位置关系, 这个过程称为系统标定。系统标定的结果会直接影响后面信息融合的质量, 是整个系统工作的基础。采用最基本的离线标定方法, 即在数字全息记录前对系统预先进行标定, 确定两个 CCD 间的相对方位和记录距离等, 并存储于计算机中, 然后在保持系统结构不改变的情况下进行全息记录, 并用存储的标定参数进行融合处理。在光路布置时, 两个 CCD 之间的空间位置采用镜像重叠的方式, 如图 2 所示, 所谓镜像重叠就是一个 CCD1 通过分束器所成的像与另一个 CCD2 完全重叠。

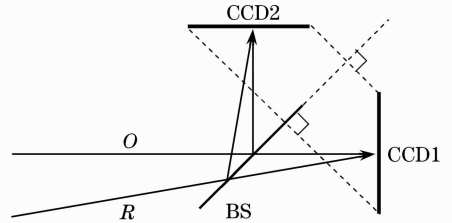


图 2 两个 CCD 的镜像重叠布置

Fig. 2 Mirroring overlapping arrangement of dual-CCD

在实际光路调节时, 研究的重点是如何保证这两个 CCD 的位置是镜像重叠的。参照迈克耳孙干涉仪的原理, 将光路中的两个 CCD 看作是两个平面反射镜, 而平面反射镜之间的空间位置可以通过两块反射镜反射光的干涉条纹来判断。这里用两个 CCD 来代替反射镜, 因此可以采用数字全息的方法来对 CCD 上记录到的光进行数字干涉, 进而判断两个 CCD 的位置调节情况。在对两个 CCD 进行调节时, 采用球面波作为物光 O , 平面波作为参考光 R , 如图 2 所示, 为了方便后面球面波的复振幅提取, 采用离轴数字全息记录光路。在物光和参考光间的夹角保持一致的条件下, 分别记录下两个 CCD 上的干涉条纹, 通过频域滤波提取出两个 CCD 上球面波的复振幅, 然后再让这两个球面波进行数字干涉叠加, 观察叠加后干涉条纹的分布情况。若两个 CCD 相对分束器的距离相等, 则干涉条纹是直条纹; 若两个 CCD 相对分束器的空间方位一致, 则条纹的宽度会很宽很稀。最理想的情况就是一个均匀白色图像, 此时说明两个 CCD 相对分束器已经调节至镜像重叠位置。由于数字干涉处理只有一个频谱滤波环节, 处理速度很快, 因此可以对光路进行实时在线

调节。

根据上面给出的两个 CCD 标定调节原理,采用如图 3 所示的实验调节光路对两个 CCD 的空间位置进行镜像位置调节标定。实验调节步骤如下:

1) 在隔振光学平台上摆放如图 3 所示的双 CCD 数字全息光路,两个 CCD 通过双通道图像采集卡与电脑连接,保证两个 CCD 的曝光时间一致,其中利用扩束镜得到的球面波与平面参考光进行离轴干涉。

2) 通过 Matlab 软件程序来实时读取两个 CCD 记录得到的全息图。提取出两个球面波的复振幅,再让这两个球面波进行干涉得到干涉条纹,根据干涉条纹的形状和疏密来手动调节其中一个 CCD 的空间位置,直到干涉条纹变得宽大甚至为白色屏为止。光的干涉测量是非常灵敏的,任何一个微小的

振动都会引起干涉条纹的变化,而本文初期对 CCD 的位置调节是通过手动调节三维光学平台上的螺旋测微器来使得两个 CCD 的位置基本达到镜像重叠,最终手动调节实验效果如图 4 所示。

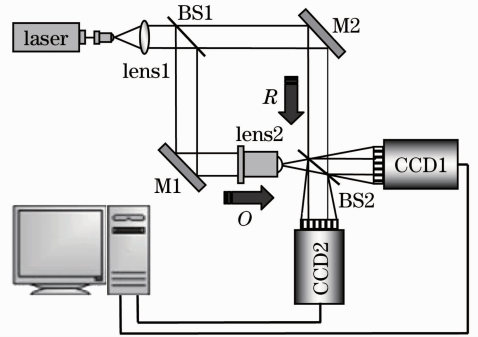


图 3 双 CCD 镜像重叠位置调节光路
Fig. 3 Adjustment optical path of dual-CCD's mirroring overlapping position

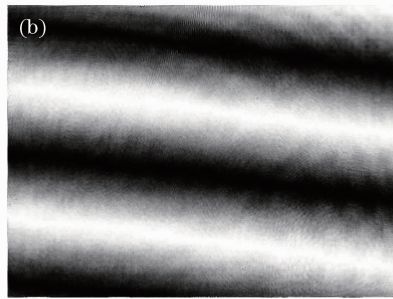


图 4 双 CCD 镜像重叠位置调节实验效果图。(a)记录距离一致时两球面波的干涉图;
(b)基本镜像重叠时两球面波的干涉图

Fig. 4 Adjusted experiment's effect images of dual-CCD's mirroring overlapping position. (a) Interference pattern of two spherical waves in the same distance; (b) interference pattern of two spherical waves when the mirroring position is nearly overlapping

从上面实时调节 CCD 的位置得到的结果可以证实关于利用球面波数字干涉来调节两个 CCD 之间方位的可行性。但是相对于光干涉现象的灵敏性,实验中手动调节 CCD 的位置时振动较大,从图 4(b)可以看出干涉条纹还不够宽,因此手动调节

只能作为初步调节方法。为了使得两个 CCD 能够最大程度地达到理想的镜像重叠位置,还必须对这两个 CCD 进行数字标定。初步的标定可以通过对其中一个数字全息图的数据矩阵进行平移来实现,具体平移值可以通过计算两个球面波顶点坐标的相

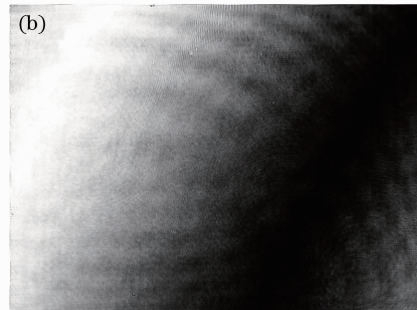
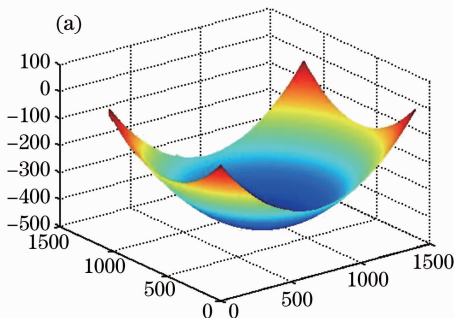


图 5 两 CCD 镜像重叠位置的标定。(a)球面波解包裹相位图;(b)标定后两球面波干涉图

Fig. 5 Calibration of dual-CCD's mirroring overlapping position. (a) Unwrapped phase image of spherical wave;
(b) interference pattern of two spherical waves after the calibration

对位置得出,经计算得出双 CCD 镜像重叠位置的标定值为(2,0),即 CCD2 记录得到的全息图需向左平移两个像素。平移标定后再进行数字干涉,实验效果如图 5 所示。

通过图 5(b)可以看出,经过平移标定处理后能够使得在 CCD 面上两球面波的干涉条纹宽度控制在一个波长以内,即条纹的最大宽度为 CCD 的光敏尺寸,记录距离可以通过计算球面波的曲率半径可知。经计算得到其中一个 CCD 相对于另一个 CCD 的镜像位置的距离可以控制在 $10\ \mu\text{m}$ 以内,而本实验所使用的两个相同型号 CCD 的像素尺寸为

$8.6\ \mu\text{m}$,可见通过上述办法调节标定后两个 CCD 至镜像重叠的误差可以控制在 1~2 个像素以内。

3.2 双 CCD 单曝光 $\pi/2$ 相移的实现

实现两个 CCD 的并行相移是实现同轴数字全息实时测量的关键,但由于是同轴数字全息,物光和参考光夹角很小,要做到单独对其中一个 CCD 上入射的参考光进行相移是不可能的。本文巧妙运用激光的线偏振特性和波片的性质,设计了以下方案来实现其中一个 CCD2 上参考光的 $\pi/2$ 相移,其光路结构如图 6 所示。

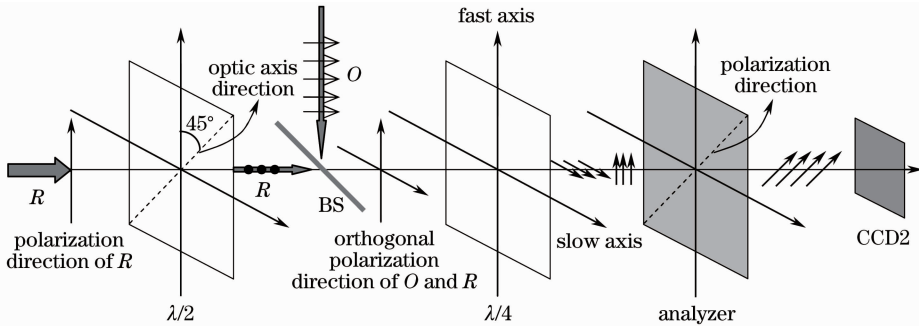


图 6 CCD2 光路中参考光 $\pi/2$ 相移的产生示意图

Fig. 6 Produced configuration of the reference wave's $\pi/2$ phase-shifting in CCD2's optical path

1) 根据激光光源的线偏振特性,在确定其偏振方向后,根据图 6 所示来安排其中一个 CCD2 的光路结构,可使得该 CCD2 上记录得到的全息图的参考光的相位相对于 CCD1 上记录得到的全息图的参考光的相位发生 $\pi/2$ 的相移。其基本原理是:首先利用 $\lambda/2$ 波片使得参考光的偏振方向旋转 90° ,再通过分束器与垂直入射的物光进行合波,此时物光和参考光的偏振方向是正交的。然后在光路中放置已知快轴和慢轴的 $\lambda/4$ 波片,旋转 $\lambda/4$ 波片使得快轴和慢轴的方向分别与物光和参考光的偏振方向一致,那么此时透射出的参考光的相位就发生了 $\pi/2$ 的延迟,而物光的相位不变。最后利用线偏振片对这两束正交偏振的物光和参考光进行检偏,使得 CCD2 上能够记录到干涉条纹。

2) 另一个 CCD1 前只放置偏振检偏器,使得未发生相移的偏振正交的物光和参考光发生干涉,用 CCD1 记录得到未相移全息图。通过上述方案,通过两个 CCD 一次并行曝光就能得到两幅相位相差 $\pi/2$ 的数字全息图。

4 实验记录与再现

下面利用调节好的双 CCD 记录光路进行实验,实验所使用的相干光源是北京大学物理系生产的波

长为 $632.8\ \text{nm}$ 的 He-Ne 激光器,两个 CCD 相机的型号均为“UNIQ UM-201”。相机参数:光敏尺寸为 $6.4\ \text{mm} \times 4.8\ \text{mm}$,分辨率为 752×582 ,像素尺寸为 $8.6\ \mu\text{m} \times 8.3\ \mu\text{m}$ 。物光和参考光的强度比通过调节物光光路上的中性滤光片来实现,两个 CCD 上的相移同轴数字全息图的同步读取通过双通道图像采集卡利用 Matlab 软件编写的程序来实现。记录对象是打印在透明薄膜上的汉字“光”,调节中性滤光片使物光的强度远小于参考光的强度,事先先挡住物光记录下两个 CCD 上的参考光强度图,如图 7 所示。

然后让物光入射,同时读取两个 CCD 上记录得到的两幅相位相差 $\pi/2$ 的数字全息图,如图 8 所示。

接着,对 CCD2 上记录得到的参考光图和全息图利用上面得出的标定值进行平移标定,使这 4 幅参考光图和数字全息图傅里叶变换至频域并进行频域滤波,滤除图中的高频噪声。最后经二维快速逆傅里叶变换后,再利用倒频谱算法对全息图和参考光强度图进行处理,得到 CCD 面上物波复振幅的实部和虚部,如图 9 所示。

利用卷积再现算法再现出被测物体的复振幅及其相位,如图 10 所示,可见物体的再现像比较清晰,原本与其重合的直透光场及其共轭像基本被滤除干

净。经分析,再现像不是很清晰的原因有以下几点:
1) 被测物体是通过型号为“HP laser jet 1020”激光打印机打印到透明薄膜上的,由于激光打印机分辨率的限制,得到的被测物体“光”并不是很清晰;2)

由于光学元器件性能的限制,光通过复杂光路后引入了较大的噪声;3) 光路中对光源偏振方向的测量,以及波片的调节不精确导致 $\pi/2$ 相移值不是很精确。

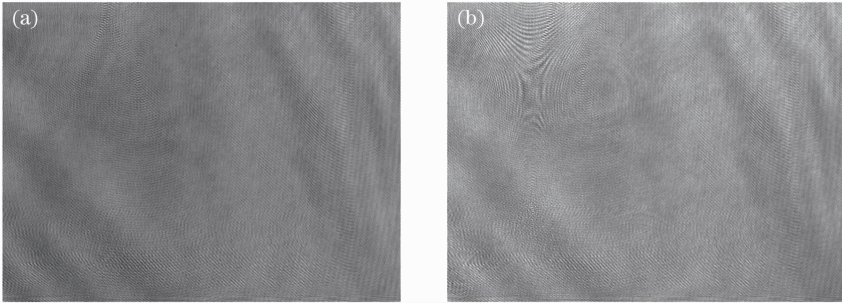


图 7 两 CCD 上分别记录得到的参考光强度图。(a) CCD1;(b) CCD2

Fig. 7 Two reference images recorded by dual-CCD. (a) CCD1; (b) CCD2

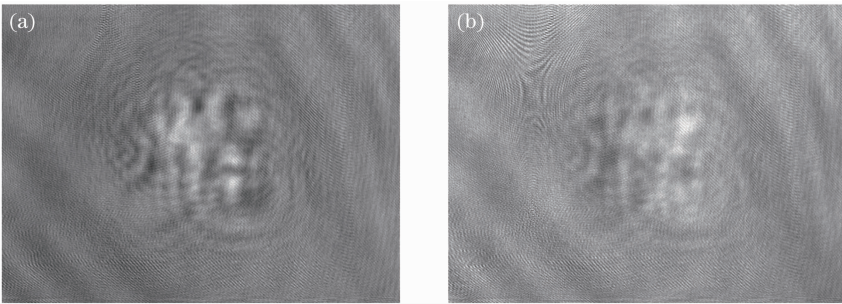


图 8 两 CCD 上分别记录得到的数字全息图。(a) CCD1;(b) CCD2

Fig. 8 Two digital holograms recorded by dual-CCD. (a) CCD1; (b) CCD2

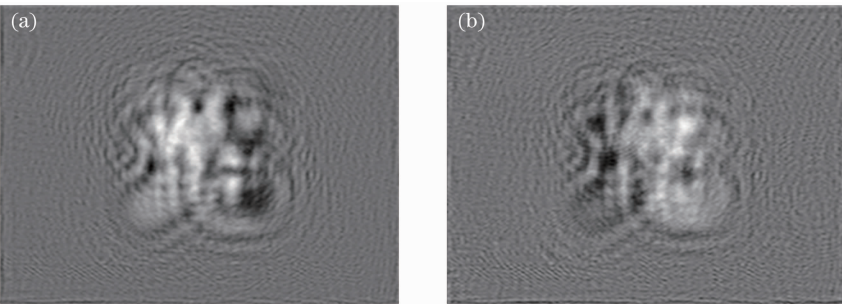


图 9 物波复振幅的实部和虚部。(a) 实部;(b) 虚部

Fig. 9 Real part and imaginary part of object wave's complex amplitude. (a) Real part; (b) imaginary part

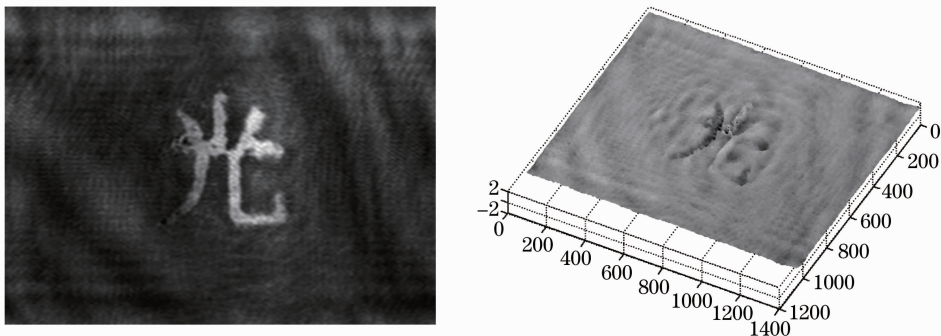


图 10 被测物体的再现像及其相位图

Fig. 10 Reconstructed image and phase image of the measured object

5 结 论

为实现同轴数字全息的实时动态测量,提出了基于双 CCD 的单曝光倒频谱相移同轴数字全息技术,对其单步相移倒频谱再现算法进行了简要介绍,重点分析了该技术中双 CCD 镜像重叠位置的调节和标定以及如何实现双 CCD 的并行相移这两个关键技术。实验结果表明:1) 利用球面波数字干涉的方法可以实现双 CCD 镜像重叠位置的实时在线调节,并且可通过计算两个球面波的相对位置得出两个 CCD 镜像重叠的精确标定参数,其标定误差小于 $10\ \mu\text{m}$,可忽略;2) 根据激光光源的线偏振性,巧妙地运用 $\lambda/2$ 波片、 $\lambda/4$ 波片和两个检偏器来实现两个 CCD 的并行 $\pi/2$ 相移,最后通过实验证明了基于双 CCD 的单曝光倒频谱相移同轴数字全息技术的可行性。

参 考 文 献

- 1 J. W. Goodman, R. W. Lawrence. Digital image formation from electronically detected holograms[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1967, **11**(3): 77~79
- 2 M. A. Kronrod, N. S. Merzlyakov, L. P. Yaroslavskii. Reconstruction of a hologram with a computer[J]. *Sov. Phys. Tech. Phys.*, 1972, **17**: 333~334
- 3 E. Cuche, P. Marquet, C. Depeursinge. Simultaneous amplitude-contrast and quantitative phase-contrast microscopy by numerical reconstruction of Fresnel off-axis holograms[J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(34): 6994~7001
- 4 A. Sten, B. Javidi. Theoretical analysis of three-dimensional imaging and recognition of micro-organisms with a single-exposure on-line holographic microscope[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2007, **24**(1): 163~168
- 5 S. Murata, M. Yasuda. Potential of digital holography in particle measurement[J]. *Opt. Laser Technol.*, 2000, **32**(8): 567~574
- 6 G. Coppola, P. Ferraro, M. Iodice *et al.*. A digital holographic microscope for complete characterization of microelectromechanical systems[J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2004, **15**(3): 529~539
- 7 J. Kühn, F. Charrière, T. Colomb *et al.*. Digital holographic microscopy for nanometric quality control of micro-optical components[C]. *SPIE*, 2007, **6475**: 64750V
- 8 P. Marquet, B. Rappaz, J. Magistretti *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
- 9 X. G. Wang, D. M. Zhao, F. Jing *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
- 10 Lü Qieni, Ge Baozhen, Zhang Yimo. Analysis of digital in-line and digital off-axis holography[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, **32**(2): 15~18
吕且妮, 葛宝臻, 张以谟. 数字同轴和数字离轴全息系统分析[J]. *光电工程*, 2005, **32**(2): 15~18
- 11 Liu Cheng, Li Liangzhu, Li Yinzhu *et al.*. Digital free of zero-order diffraction and conjugate image[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(4): 427~431
刘 诚, 李良柱, 李银柱 等. 无直透光和共轭像的数字全息[J]. *光学学报*, 2002, **22**(4): 427~431
- 12 YingJie Yu, Wenjing Zhou, Orphanos Yannis *et al.*. Phase-shifting digital holography in image reconstruction[J]. *Journal of Shanghai University*, 2006, **10**(1): 59~64
- 13 N. Brock, J. Hayes, B. Kimbrough *et al.*. Dynamic interferometry[C]. *SPIE*, 2005, **5875**: 58750F
- 14 Y. Awatsuji, M. Sasada, T. Kubota. Parallel quasi-phaseshifting digital holography[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **85**(6): 1069~1071
- 15 Y. Awatsuji, A. Fujii, T. Kubota *et al.*. Parallel three-step phase-shifting digital holography [J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(13): 2995~3002
- 16 T. Nomura, S. Murata, E. Nitanai *et al.*. Phase-shifting digital holography with a phase difference between orthogonal polarizations[J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(20): 4873~4877
- 17 Pan Yun, Pan Weiqing, Chao Mingju. Single phase-shifting lensless Fourier in-line digital holography based on cepstrum technology[J]. *Optical Technique*, 2012, **38**(1): 40~45
潘 云, 潘卫清, 晁明举. 一种实现单步相移无透镜傅里叶同轴数字全息的倒频谱技术[J]. *光学技术*, 2012, **38**(1): 40~45
- 18 Y. Zhang, G. Pedrini, W. Osten *et al.*. Aperiodic photonic quantum-well structures for multiple channelled filtering at arbitrary preassigned frequencies[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(12): 1787~1792

栏目编辑: 马 沂