

文章编号:1004-4213(2011)08-1282-5

一种在二步相移数字全息中实现准确相移的方法

秦怡, 巩琼, 杨兴强

(南阳师范学院 物理与电子工程学院, 河南 南阳 473061)

摘 要:相移数字全息中的相移准确性决定了重建结果的质量,本文提出了在二步相移数字全息中实现准确相移的方法.该方法使用数字电压源开环控制普通的压电陶瓷微位移器,通过连续以微小的间隔来改变施加在压电陶瓷微位移器上的电压,可以获得一系列对应于不同相移角的全息图像,进而可以利用这些全息图像重建出来物光波在全息面上的强度分布.实验中采用已被 CCD 直接记录的物光波在全息面上的强度分布作为标准来评价前面重建结果的质量,计算了这些重建结果和评价标准之间的相关系数,结果表明相关系数达到最大时对应的全息图具有准确的相移角 $\pi/2$.实验中比较了使用所确定准确相移角和理论相移角分别重建出来物光波的质量,计算机模拟和实验的结果证实了该方法的有效性.

关键词:全息术;数字全息;准确相移;相关系数

中图分类号: TB877

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20114008.1282

0 引言

数字全息技术采用 CCD 等图像传感器代替传统的全息干板,同时使用计算机模拟光的传播过程,能够对被测物体进行定量的三维重构^[1-6].这种测量手段具有无损、快速等特点,并且全息图像的存储、处理、传输都非常的方便,因此越来越引起人们的重视和关注.目前,分辨率问题是数字全息技术应用过程中最重要的制约因素,所以数字全息常常采用同轴装置来获取最充分的物体空间频率,并利用相移技术消除它的零级像和共轭像,从而重建出所需要的原始像^[7-9].因此,在相移数字全息中,相移的准确性决定了原始像恢复准确性.部分学者针对于相移的准确性进行了相关研究, M. Atlan 等提出了一种实现精确相移的装置^[10], K. Kinnstaetter 等人也提出了一种实现准确相移的自校准装置^[11].在目前的相移技术中最广泛应用的相移装置是压电陶瓷微位移器,然而,压电陶瓷微位移器是一种非线性器件,要实现对其精密控制,一般来说应采用闭环控制电路对其进行控制,并且需要复杂的标定程序.不少学者在这方面做了许多卓有成效的研究^[12-13].但是,用这些控制电路来实现准确的相移仍有不可避免的缺点.首先,精密的相移装置的精确度依然有限,这是由于控制电路和压电陶瓷微

位移器的非线性决定的;其次,对相移器的精密控制并不意味着光路的准确移相,因为记录过程中可能会出现随机的误差(例如气流,振动等),这会使所谓的准确移相变得没有意义;此外,这些闭环自动控制电路造价昂贵.在本文所提的方法中采用普通的数字电压源来对压电陶瓷器进行开环控制,并能够通过所提出的算法获得准确的相移,而且这种方法对记录过程中有没有瞬间的抖动可以准确地甄别,提高了重建过程的抗干扰能力.理论分析和实验结果均证实了该方法的可行性.

1 理论分析

二步相移数字全息的装置如图 1, Light Source 是光源经滤波和准直后的均匀平面光波,此光束被

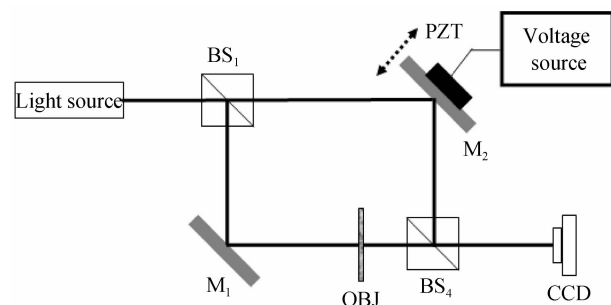


图 1 二步相移数字全息实验装置

Fig. 1 Experimental setup of two-step phase-shifting digital holography

基金项目:南阳师范学院青年项目基金(No. QN2011004)资助

第一作者:秦怡(1981-),男,助教,硕士,主要研究方向为光电信息处理. Email:641858757@qq.com

收稿日期:2010-12-23;修回日期:2011-02-21

分束镜 BS_1 分成两路,其中一束被反射镜 M_2 反射,用来产生全息所需要的参考光波.另一束被 M_1 反射,照明被测物体(OBJ)而形成物光波,这两束光经分束镜 BS_2 再次结合后在 CCD 面上干涉,产生的全息图由 CCD 记录并以数字的形式输入到计算机.反射镜 M_2 粘贴到压电陶瓷微位移器(PZT)上,用来实现参考光的移相,此处使用普通的数字电压源来驱动 PZT,只需要能够使 PZT 能够连续的产生微位移即可,不需要进行精确的闭环控制.

采用二步相移法进行数字全息实验时,需要记录的四幅全息图强度分布分别为

$$\begin{aligned} I_1(x,y) &= I_R(x,y) + I_O(x,y) + \\ &\quad \sqrt{I_O(x,y)I_R(x,y)} \exp[i\varphi(x,y)] + \\ &\quad \sqrt{I_O(x,y)I_R(x,y)} \exp[-i\varphi(x,y)] \\ I_2(x,y) &= I_R(x,y) + I_O(x,y) + \\ &\quad \sqrt{I_O(x,y)I_R(x,y)} \exp\left\{i\left[\varphi(x,y) - \frac{\pi}{2}\right]\right\} + \\ &\quad \sqrt{I_O(x,y)I_R(x,y)} \exp\left\{-i\left[\varphi(x,y) - \frac{\pi}{2}\right]\right\} \\ I_3(x,y) &= I_O(x,y) \\ I_4(x,y) &= I_R(x,y) \end{aligned} \quad (1)$$

式中, $I_1(x,y)$ 是由 CCD 记录的第一幅全息图, $\varphi(x,y)$ 是物光波和参考光波在 CCD 面上的相对相位分布. $I_2(x,y)$ 是对 $I_1(x,y)$ 的参考光移相 $\pi/2$ 后记录的第二幅全息图. $I_O(x,y)$ 和 $I_R(x,y)$ 分别是物光波和参考光波在 CCD 面上的强度分布,记录其中一个的时候需要把另外一个遮挡.

需要注意的是,在记录上述四幅全息图像的时候, $I_1(x,y)$, $I_3(x,y)$ 和 $I_4(x,y)$ 的记录都非常的简单,只有 $I_2(x,y)$ 的记录需要进行移相,所以必须保证由 $I_1(x,y)$ 移相到 $I_2(x,y)$ 的相移准确性,在后面的讨论中我们把 $I_2(x,y)$ 的准确性作为讨论的重点.

在相移准确的情况下,可以由式(2)来重建全息面(即 CCD 面)上的物光波复振幅

$$O_d(x,y) = \frac{I_1 - I_3 - I_4 - \exp(-i\pi/2)[I_2 - I_3 - I_4]}{\sqrt{I_4}[1 - \exp(-i\pi)]} \quad (2)$$

对 $O_d(x,y)$ 进行逆衍射就得到了原始物光场的分布.与此同时,也得到了重建出来的物光波在 CCD 面上的分布

$$\begin{aligned} I_d(x,y) &= |O_d(x,y)|^2 = \\ &\quad \left| \frac{I_1 - I_3 - I_4 - \exp(-i\pi/2)[I_2 - I_3 - I_4]}{\sqrt{I_4}[1 - \exp(-i\pi)]} \right|^2 \end{aligned} \quad (3)$$

前面已经提到,可以用数字电压源控制压电陶瓷微位移器进行连续的位移,这样,就可以给压电陶

瓷器 PZT 施加一个电压,使其产生的位移可使参考光近似移相 $\pi/2$.然后,在这个电压附近连续以微小的间隔连续地改变,这样,在相移角 $\pi/2$ 附近获得许多幅 $I_2(x,y)$,但是具体哪一幅是真正对 $I_1(x,y)$ 的参考光准确移相 $\pi/2$ 之后得到的,并不清楚.基于此,提出如下方法来鉴别:

1)对于每一个 $I_2(x,y)$,都使用式(3)进行计算,得到一系列 $I_d(x,y)$;

2)把得到的一些列 $I_d(x,y)$ 和前面被 CCD 记录下来的 $I_O(x,y)$ (即 $I_3(x,y)$) 进行比较,最接近 $I_O(x,y)$ 的那一幅所对应的 $I_2(x,y)$,就是准确的对 $I_1(x,y)$ 的参考光准确移相 $\pi/2$ 得到的.

这个方法的基本依据就是,CCD 记录下来的 $I_O(x,y)$ 是物体真实的衍射光波,这是评价相移准确与否的标准.而在准确移相 $\pi/2$ 的理想情况下,把不同的 $I_2(x,y)$ 代入式(3)所重建出来的同一个光波 $I_d(x,y)$ 一定等于 $I_O(x,y)$,考虑到种种实际因素的影响,不采用“相等”而采用“最接近”来作为寻找 $I_2(x,y)$ 的条件.

使用相关系数来表示 $I_d(x,y)$ 与 $I_O(x,y)$ 之间的接近程度.对于矩阵 \mathbf{A} 和 \mathbf{B} ,二者之间的相关系数被定义为^[14]

$$\rho_{AB} = \frac{\text{COV}(\mathbf{A}, \mathbf{B})}{\sqrt{D_A D_B}} \quad (4)$$

$\text{COV}(\mathbf{A}, \mathbf{B})$ 表示 \mathbf{A} 、 \mathbf{B} 之间的协方差, D_A 、 D_B 分别是矩阵 \mathbf{A} 和 \mathbf{B} 的方差.因此, $I_d(x,y)$ 与 $I_O(x,y)$ 之间的相关系数可以表示为

$$\rho = \frac{\text{COV}(I_d, I_O)}{\sqrt{D_{I_d} D_{I_O}}} \quad (5)$$

利用这种方法找到最接近准确的相移全息图像 $I_2(x,y)$ 之后,就可以计算出来对应的对 $O_d(x,y)$,然后对 $O_d(x,y)$ 进行逆衍射,就得到了物体的原始光波复振幅分布.

2 计算机模拟

针对所提出的方法首先进行了计算机模拟.模拟所使用的实验装置如图 1,模拟的物体为一振幅型物体,其振幅分布如图 2,物体大小为 $5.12 \times 5.12 \text{ mm}^2$, 512×512 像素,物体至全息面的距离 $d=200 \text{ mm}$.

在模拟中,首先用 CCD 记录下用来进行重建的三幅强度图像,如图 3.其中,图 3(a)第一幅全息图片,即式(1)中的 $I_1(x,y)$,图 3(b)是 CCD 记录物体在面上的衍射图像,即公式(1)中的 $I_3(x,y)$,图 3(c)为平面参考光波的强度,即式(1)中的 $I_4(x,y)$.得到此三幅图片后,再对参考光进行一系列对应于



图 2 模拟物体的振幅分布
Fig. 2 Amplitude distribution of the object simulated

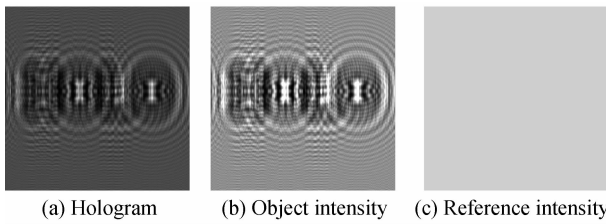


图 3 CCD 记录的三幅强度图像
Fig. 3 Three intensity images recorded by CCD

不同于相移角的移相,就得到了一系列 $I_2(x,y)$, 这里在 $[\pi/4, 3\pi/4]$ 之间以 $\pi/100$ 的间隔来改变相移角. 得到 $I_2(x,y)$ 之后用公式 (3) 对物光波在 CCD 面上的强度分布进行重建,进而使用公式 (5) 来计算相关系数 ρ . 计算结果在图 4 中给出.

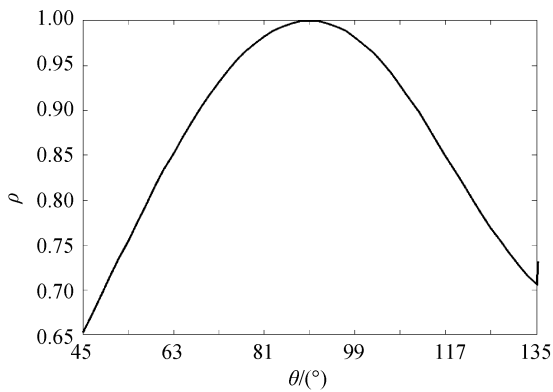


图 4 θ 和 ρ 之间的函数关系
Fig. 4 Relationship between ρ and θ

图 4 表明,在相关系数 ρ 达到最大值 1 的时候,此时对应的 θ 为 1.57 rad(即 90°),可见,相关系数最大的时候,其对应的 θ 值正是实际的相移角,这证实了第 1 部分所做的理论分析.

3 实验及结果

为了进一步证实所提方法的正确性,对第 1 部分的理论分析进行了实验验证. 实验装置如图 1, 实验所用光源为发光二极管,中心波长为 $\lambda=655\text{ nm}$, 被测物体为 USAF 1951 标准分辨率板,全息图由 CCD (MINTRON 22K9HC, 795×596 像素, $8.33 \times 8.33\ \mu\text{m}^2$) 进行记录,全息图的大小为

$4.26 \times 4.26\ \text{mm}^2$, 物体距离全息面的距离为 $d=150\ \text{mm}$. 首先记录移相前的三幅图像,即式 (1) 中的 $I_1(x,y), I_3(x,y), I_4(x,y)$, 如图 5.

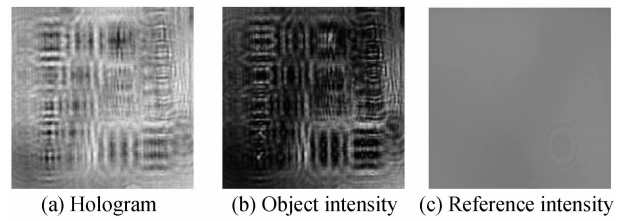


图 5 实验中 CCD 记录的三幅强度图像
Fig. 5 Three intensity images recorded by CCD in the experiment

图 5(a) 为参考光移相之前的全息图片,图 5(b) 是物体在 CCD 上的衍射强度分布,图 5(c) 为参考平面波的强度分布.

然后通过连续改变施加于压电陶瓷器微位移器上的电压,来获取第二幅全息图 $I_2(x,y)$. 根据所用压电陶瓷微位移器的电压-位移曲线,要使参考光移相 $\pi/2$,应该施加给压电陶瓷微位移器的电压为 $U=6.6\ \text{V}$. 在 $U=6.6\ \text{V}$ 附近以 $\Delta U=0.2\ \text{V}$ 变化间隔来连续的改变加在压电陶瓷微位移器上的电压,就相当于以微小的间隔连续的改变实际的相移角. 图 6 给出了在三种不同驱动电压下记录的三幅相移全息图像(即 $I_2(x,y)$).

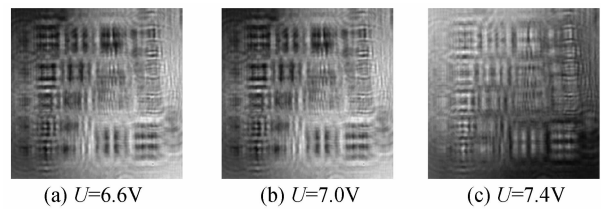


图 6 对压电陶瓷微位移器施加不同驱动电压所获取的三幅相移全息图
Fig. 6 Three different phase shift holograms when different voltages are exerted on the PZT

然后使用式 (5) 计算出来对应的相关系数,得到的 U 和 ρ 之间的函数关系如图 7.

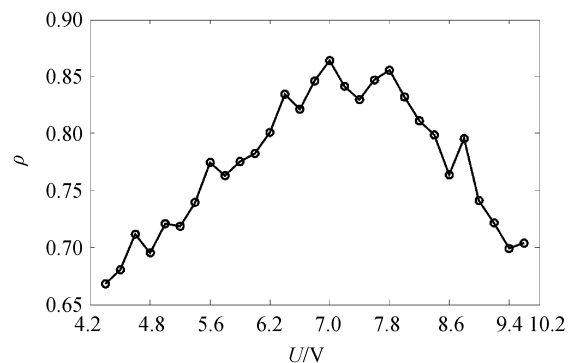


图 7 U 和 ρ 之间的函数关系
Fig. 7 Relationship between ρ and θ in the experiment

通过图 7 可见,相关系数达到最大值 0.863 8 的时候,其对应的相移压电陶瓷器驱动电压为 $U=7.0\text{ V}$,并非理论上的 $U=6.6\text{ V}$,分别使用 $U=6.6\text{ V}$ 和 $U=7.0\text{ V}$ 所获得的移相后的全息图进行物光波的重建,得到的原始物光波强度如图 8.

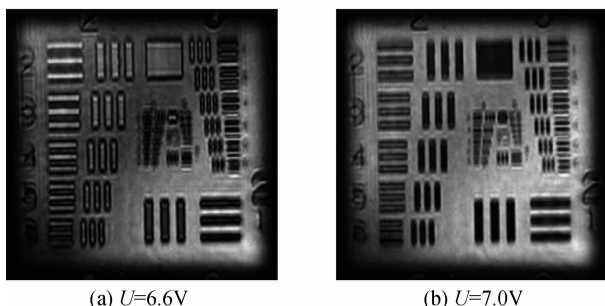


图 8 使用不同相移驱动电压重建得到的物体强度分布
Fig. 8 Reconstructed object intensity distributions when different phase-shifting voltages are used

从图 8 可以看出,图 8(b)的质量明显好于图 8(a),这有力地说明了 $U=7.0\text{ V}$ 时的相移角最接近于 $\pi/2$,可以认为实现了准确的相移.因此我们提出的方法得到了进一步的证实.

实际上,对于压电陶瓷微位移器的电压控制,文中采用了电压间隔 $\Delta U=0.2\text{ V}$.显然,电压间隔越小,所获得的相移越接近于真实的 $\pi/2$,也就是说,实验的准确度可以人为地控制.此外,图 7 中的数据也表明,相关系数并不是随着压电陶瓷微位移器驱动电压而线性变化,这说明微位移器本身以及光路中的种种位移误差是随机存在的,而且是可以透过相关系数的大小来反映出来的,这就是本文所提出的方法抗干扰能力的体现.显然,在记录过程中物光波或者参考光波出现的变化会影响重建的结果,因此保证光源的稳定性是必要的.

4 结论

本文提出了一种在二步相移数字全息中实现准确的移相的简单方法,它通过连续的改变加在压电陶瓷微位移器上的驱动电压,来获取一系列的对应于不同相移角的全息图像,进而重建出来一系列物光波在全息面上的强度分布,然后把与 CCD 记录下来的物体在全息面上真实强度分布相比较,与之最相似的那一幅就是参考光相移 $\pi/2$ 之后重建得到的.这种方法采用了简单的软件算法来判断相移的准确性,从而省去了对压电陶瓷微位移器的复杂闭

环控制,降低了实验的成本.其可行性被计算机模拟和实验结果所证实.

参考文献

- [1] ZHANG Wen, ZHOU Hao, GU Ji-hua, *et al.* Multi-beam digital holography[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(3): 533-536.
张雯,周皓,顾济华,等.多光束数字全息的研究[J].光子学报,2010,**39**(3):533-536.
- [2] QIAN Xiao-fan, WANG Zhan-liang, ZHANG Hai-tao, *et al.* Vibration amplitude distribution measurement using phase of reconstructed wave in time-average digital holography[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(3): 523-526.
钱晓凡,王占亮,张海涛,等.基于相位分析的时间平均数字全息测振研究[J].光子学报,2010,**39**(3):523-528.
- [3] YUAN Cao-jin, ZHAI Hong-chen. Digital holographic super-resolution imaging with phase mask [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(3): 893-896.
袁操今,翟宏琛.利用相位模板实现数字全息超分辨成像[J].光子学报,2010,**39**(3):523-526.
- [4] XIN Kang. An effective method for reducing speckle noise in digital holography[J]. *Chn Opt Lett*, 2008, **6**(2): 100-103.
- [5] GRILLI S, FERRARO P, de NICOLA S, *et al.* Whole optical wavefields reconstruction by digital holography [J]. *Opt Express*, 2001, **9**(6): 298-302.
- [6] ZHONG Li-yun, ZHANG Yi-mo, LÜ Xiao-xu, *et al.* Analysis of some fundamental issue about digital hologram[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(4): 465-470.
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):465-470.
- [7] YAMAGUCHI I, OHTA S, KATO J. Surface contouring by phase-shifting digital holography[J]. *Optic Lasers Eng*, 2001, **36**: 417-428.
- [8] YAMAGUCHI I, ZHANG T. Phase-shifting digital holography[J]. *Opt Lett* 1997, **22**(16): 1268-1270.
- [9] CAI L Z, LIU Q, YANG X L. Phase-shift extraction and wave-front reconstruction in phase-shifting interferometry with arbitrary phase steps[J]. *Opt Lett*, 2003, **28**(19): 857-859.
- [10] ATLAN M, GROSS M, ABSIL E. Accurate phase-shifting digital interferometry[J]. *Opt Lett*, 2007, **32**(11): 1456-1458.
- [11] KINNSTAETTER K, LOHMANN A W, SCHWIDER J. Accuracy of phase shifting interferometry [J]. *App Opt*, 1988, **27**(24): 5082-5089.
- [12] LI Xi-de, LIN Wei-xing, WU Xiao-ping, *et al.* Phase shift automatic calibration with the same optical system in phase-shifting interferometry[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1994, **14**(9): 956-960.
李喜德,林卫星,伍小平.相移干涉计量中相移器的同光路自动标定[J].光学学报,1994,**14**(9):956-960.
- [13] FAN Hua, ZHANG Chi, REN Ya-ping, *et al.* Study of a high precision phase shifter employed in phase shifting metrology[J]. *Chin J Lasers*, 1999, **A26**(1): 21-25.
范华,张弛,任亚萍,等.相移干涉计量中高准确度相移器的研究[J].中国激光,1999,**A26**(1):21-25.
- [14] GONZALEZ R C, WOODS R E. Digital image processing [M]. New York: Prentice Hall,2002, 489-490

A Method for Accurate Phase Shift in Two-step Phase-shifting Digital Holography

QIN Yi, GONG Qiong, YANG Xing-qiang

(College of Physics and Electronic Engineering, Nanyang Normal University, Nanyang, Henan 473061, China)

Abstract: The quality of reconstruction in phase-shifting digital holography was determined by the accuracy of phase shift. An approach to obtain accurate phase shift in two-step digital holography was proposed. This approach employed an ordinary open-loop controlled piezoelectric actuator, and a serial of phase shift holograms corresponding to different phase shift angles would be obtained by means of changing the voltage exerted on the piezoelectric actuator continuously. Then the holograms could be used to reconstruct the object intensity on the CCD plane. The object intensity on the CCD plane that already recorded by CCD would be used as a criterion to evaluate the quality of the reconstruction. The correlation coefficients between the criterion and the same intensity reconstructed with different phase shift holograms were obtained. The correlation coefficient reached its maximum when the phase shift hologram is with the accurate phase shift angle. Simulation was carried out and thereafter the approach was employed in experiment. The quality of the reconstructed field by using the accurate value and the nominal value were compared. The feasibility of this method has been verified by both computer simulations and experiments.

Key words: Holography; Digital holography; Accurate phase shift; Correlation coefficient