

提高数字全息再现像像质的两步相移迭代算法

吴友朋¹ 刘祥莹¹ 王红霞²

(¹ 西安高科技研究所 503 教研室, 陕西 西安 710025)
(² 西安高科技研究所物理教研室, 陕西 西安 710025)

摘要 在两步相移数字全息术中, 相移误差直接影响着零级像和共轭像的消除。为了消除相移误差, 获得实际相移值, 提出了一种基于相位统计特性的两步相移迭代算法。首先利用全息图的相位统计特性计算出初始相移值, 然后用数字全息图再现像抽样点强度偏差之和作为评价标准, 通过迭代计算寻找参考光的真正相移值。该算法能对任意未知相移量进行提取, 从而有效地消除零级像和共轭像, 提高了再现像质量。理论分析和光学实验结果证明了该方法的可行性和有效性。

关键词 数字全息; 两步相移; 相移误差; 迭代算法; 数字再现

中图分类号 O438

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS20082812.2292

Two-Step Phase-Shifting Iterative Algorithm of Improving Quality of Reconstructed Image in Digital Holography

Wu Youpeng¹ Liu Xiangxuan¹ Wang Hongxia²

(¹ 503 Staff Room, Xi'an High Technology Studio, Xi'an, Shaanxi 710025, China)
(² Physic Staff Room, Xi'an High Technology Studio, Xi'an, Shaanxi 710025, China)

Abstract In two-step phase-shifting digital holography, the elimination of the zero-order image and conjugate image is directly affected by the phase-shifting error. To eliminate the phase-shifting error and obtain the actual phase-shifting value, the two-step phase-shifting iterative algorithm is presented, based on the statistic property of the phase distribution of the diffraction field in recorded plane. In this method, the initial phase-shifting value is calculated directly from the holograms, and then the sum of the intensity bit errors between the reconstructed image and the holograms is taken as an evaluation function for an iterative algorithm to find the actual phase-shifting value. With this method, any unknown actual phase-shifting value can be found out, so the zero-order image and conjugate image are effectively eliminated, and the quality of the reconstructed image is enhanced. The feasibility and validity of this method are demonstrated by theoretical analysis and optical experimental result.

Key words digital holography; two-step phase-shifting, phase-shifting error; iterative algorithm; numerical reconstruction

1 引言

数字全息术^[1]用电荷耦合器件(CCD)代替普通全息材料记录全息图, 通过计算机采用适当的算法模拟再现光场, 进行数字全息图的数字再现, 实现了全息图记录、存储和再现全过程的数字化。由于再

现像光场复振幅分布直接是以数字形式描述的, 可以进行定量测量分析, 因此数字全息在光测量等领域均具有广泛的应用价值^[2~8]。由于目前记录数字全息图的 CCD 光敏面尺寸小、像元尺寸大和分辨率低, 导致数字全息记录中的参物光夹角小, 采样频率

收稿日期: 2008-03-17; 收到修改稿日期: 2008-05-09

作者简介: 吴友朋(1980—), 男, 博士研究生, 主要从事光学信息处理和隐身材料的研究。

E-mail: pengpengstudent@163.com

导师简介: 刘祥莹(1963—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事光学信息处理和纳米光电对抗隐身材料的研究。

E-mail: wdwwdw1993@163.com

低,在菲涅耳衍射距离上难以记录较高空间频率的物光场^[9~11]。用同轴光路记录数字全息图可以在很大程度上解决满足采样条件的问题。但是,同轴数字再现时零级像、共轭像和真实像相互干扰,影响了再现像的质量。在数字全息术中加入相移技术^[12],利用不同的相移算法,能够有效消除共轭像和零级衍射光。

为了消除数字全息中零级像和共轭像对再现像像质的干扰,本文利用两步相移技术消除干扰项。为了消除实验中的相移误差,基于相位统计特性^[13],提出了一种有效消除相移误差的新方法。

2 基本原理

假设物体散射的光经菲涅耳衍射至记录面,其上的物光场分布可表示为

$$O(x, y) = A_0(x, y) \exp[j\varphi(x, y)], \quad (1)$$

式中 A_0 为物光的振幅, φ 为物光的相位。设参考光为振幅为 A_R 的平面波,相移后被记录的参考光场为

$$R(x, y) = A_R(x, y) \exp(j\alpha). \quad (2)$$

首先利用两个快门分别记录参考光的强度 I_R 和物光的强度 I_0 ,然后利用相移器分别对参考光采取二次不同的相移值 $0, \alpha$,则在 CCD 平面上分别记

录相应产生的全息图光强度 I_1, I_2 :

$$I_1 = I(x, y; 0) = I_0 + I_R + O^*(x, y)R(x, y) + O(x, y)R^*(x, y), \quad (3)$$

$$I_2 = I(x, y; \alpha) = I_0 + I_R + O^*(x, y)R(x, y) \exp(j\alpha) + O(x, y)R^*(x, y) \exp(-j\alpha), \quad (4)$$

式中 * 为复共轭符号。联立(3),(4)式求解,可得 CCD 平面上物光复振幅为

$$O(x, y) = \frac{I_1 - I_0 - I_R - \exp(-j\alpha)[I_2 - I_0 - I_R]}{[1 - \exp(-j2\alpha)]R^*} \quad (5)$$

注意到 $R^*(x, y) = \sqrt{I_R}$, 经过计算得到 CCD 平面上的物光复振幅分布 $O(x, y)$ 后,再用数字计算模拟物光 $O(x, y)$ 以菲涅耳衍射形式传播到像平面的过程,通过衍射的逆运算,可再现出原物光场。需要说明的是,若参考光是球面波, $R^*(x, y) = \sqrt{I_R} \exp[-jk(x^2 + y^2)/(2Z_0)]$ 通过实验测量得到波面半径 Z_0 后,仍然可由(5)式求出 $O(x, y)$ 。

由于记录过程中只需对参考光进行一次相位移动的操作,因此使实验操作过程大为简化,相移次数减为最少,可期望在实验过程中引入的相移误差减为最低。

对相移前后的两幅数字全息图如下运算:

$$\begin{aligned} I_1 - I_2 &= 2A_0(x, y)A_R(x, y) \{ \cos[\varphi(x, y)] - \cos[\varphi(x, y) - \alpha] \} \\ &= 4A_0(x, y)A_R(x, y) \sin[\varphi(x, y) - \alpha/2] \sin(\alpha/2). \end{aligned} \quad (6)$$

假设在以下计算过程中满足条件 $0 < \alpha < \pi$ 。由于 $I_0 = A_0^2$ 和 $I_R = A_R^2$ 在实验中可以利用 CCD 拍摄得到,(6)式可重新写为

$$\frac{I_1 - I_2}{4 \sqrt{I_0 I_R}} = \sin\left[\varphi(x, y) - \frac{\alpha}{2}\right] \sin \frac{\alpha}{2}. \quad (7)$$

由于物光波经过菲涅耳衍射后,记录平面上物场的相位分布基本上是随机的,可以推知,不管常数 α 取何值,都有近似关系

$$\langle |\sin[\varphi(x, y) - \alpha/2]| \rangle = 2/\pi, \quad (8)$$

式中 $\langle \rangle$ 表示对整幅全息图取平均。引入一个新参数

$$p = \left\langle \left| \frac{I_1 - I_2}{4 \sqrt{I_0 I_R}} \right| \right\rangle = \frac{2}{\pi} \sin \frac{\alpha}{2}, \quad (9)$$

于是有 $\alpha = 2 \arcsin(\pi p/2)$. (10)

因此通过记录的图像 I_2, I_1, I_0 和 I_R , 可以计算出 p , 进而求出实际相移量 α 。当所有 α 已知后,将其代入(5)式,就可以计算出记录面上的复振幅场 $O(x, y)$ 。

由上面的推导可知,该方法的理论依据是记录面上物波的相位分布是随机的,因此近似满足 $\langle |\sin[\varphi(x, y) - \alpha/2]| \rangle = 2/\pi$ 。事实上,受各种实际因素的影响,上述近似会有一定误差。为了提高该方法的准确性,本文提出进一步采用迭代方法,用调焦函数作为评价参数对清晰度进行评价,寻找真正的相移值。

利用(10)式确定 α 初值后,代入(5)式计算 CCD 面上物光光场分布,提取已得到的 $O(x, y)$ 的相位 $\varphi(x, y)$, 将 $\varphi(x, y)$ 和 α 作为已知量,此时调焦函数可写为

$$\begin{aligned} \Delta E &= \sum \{ |I_1 - (A_0^2 + A_R^2 + 2A_0 A_R \cos \varphi)| + \\ &\quad |I_2 - [A_0^2 + A_R^2 + 2A_0 A_R \cos(\varphi - \alpha)]| \}, \end{aligned} \quad (11)$$

式中, \sum 表示所有采样点之和。由(11)式可见,一个 α 对应一个 ΔE 。因此, ΔE 是以 α 为变量的函数,并且当 α 等于真实值时, ΔE 取到最小值 0。如果逐步寻找使

ΔE 具有变小趋势的 α , 最终可以找到一个 α , 使 ΔE 达到最小值, 而这时找到的 α 正是相移过程中的真实值。当最终的相移值 α 和记录面上的物波波前 $O(x, y)$ 计算出以后, 由菲涅耳逆变换再现出原物场。

对于透射型物体, 记录面上物波的相位都有确定的值, 从整体分布看只是近似随机分布, 因此(10)式并不准确, 但由于采用了迭代算法, 可以增加迭代次数来提取真正的相移值, 因此该方法不仅对于漫射型物体适用, 对于光滑物体和透射型物体同样适用。

3 实验及结果

3.1 实验光路

同轴菲涅耳数字全息的光路如图 1 所示, 激光器发出的激光束经由扩束镜 L_1 、针孔、准直透镜 L_2 组成的扩束准直系统变为平行光, 扩束后的平行光经分束器 BS_1 分为两束, 一束经反射镜 1 反射后通过 $1/4$ 相位敏感探测器 (PSD), 再经分束器 BS_2 反射到 CCD 上作为参考光, 另一束经反射镜 2 反射后照明物体后作为物光波, 物光透过分束器 BS_2 后与参考光发生干涉, 到达 CCD 光敏面后, 形成同轴全息图记录在 CCD 上, 以数字的方式存储在计算机中。

按照图 1 设计的光路图, 搭建实验系统。He-Ne 激光器功率为 10 mW, 波长 $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$, 经扩束准直后变为直径为 20 mm 的平行光分别作为物光和参考光。实验中所用的物体是标有字母的透明片, 横向尺寸小于 $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 。由于透明片透光能力非常强, 为防止 CCD 饱和, 在激光器前放入一个衰减器, 衰减光束的强度。所用的 CCD

为 Mintron 公司生产的 1881CB 型号相机, 其靶面的实际尺寸为 $6.4 \text{ mm} \times 4.8 \text{ mm}$, 像素数为 795(水平方向) \times 596(垂直方向), 最低照度为 0.02 lux。图像采集卡为嘉恒中自图像技术有限公司的 OK_C33 型, PAL 制下最高分辨率为 768(水平方向) \times 576(垂直方向)。由此可以求得, 计算机从图像采集卡获取的像素的实际大小是 $8.33 \mu\text{m} \times 8.33 \mu\text{m}$ 。数字再现的程序是使用 Matlab 语言进行编程和计算的。

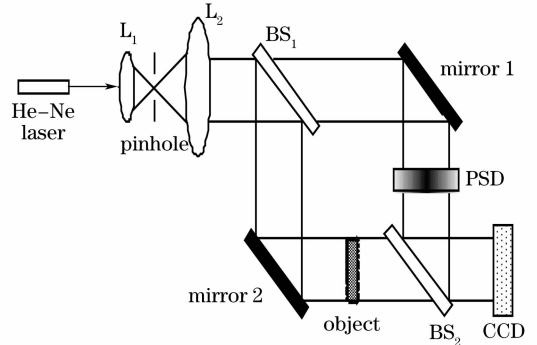


图 1 同轴数字全息图的记录光路

Fig. 1 Experimental recording scheme for in-line digital holograms

3.2 实验结果及分析

图 2 是记录距离为 $Z_0 = 334 \text{ mm}$ 时记录的同轴和离轴数字全息图及数字再现的实验结果, 其中图 2(a), 图 2(b) 为同轴相移前后记录的数字全息图, 图 2(c) 是对所得传统同轴全息图直接再现的结果, 可看见聚焦像的周围有一些衍射花纹, 这是同轴全息中零级衍射像和 ± 1 级衍射像相互重叠引起的, 致使字符“大”的轮廓几乎无法辨认。

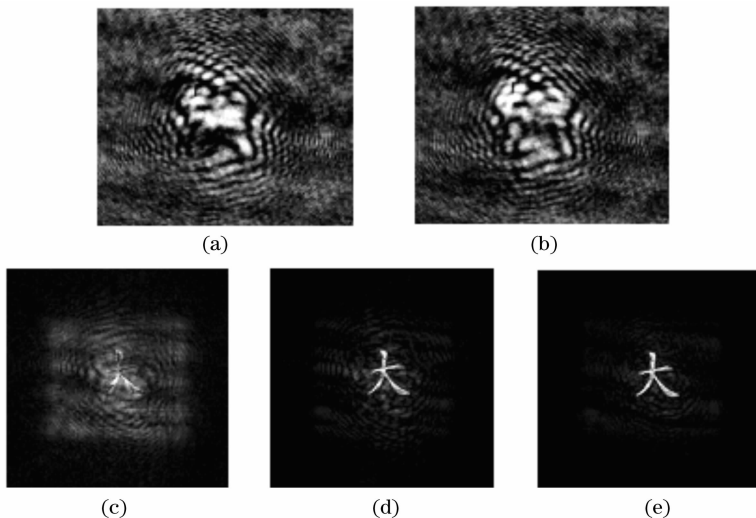


图 2 相移前(a)后(b)记录的数字全息图和利用卷积法(c)、理论相移值卷积法(d)、实际相移值卷积法(e)再现的结果
Fig. 2 Digital holograms before phase-shifting (a) and after phase-shifting (b), reconstructed images by convolution method (c), theoretical phase-shifting convolution method (d), real phase-shifting convolution method (e)

3.2 实验结果及分析

图 2(d) 是利用两步相移算法对全息图的数字再现结果, 由于在再现过程采用的是实验设计值 α , 由于相移误差 $\Delta\alpha$ 的存在, 参考光真正的相移值 α' 并不等于实验设计值 α , 根据 (5) 式计算所得在 CCD 平面上的物光复振幅并不是 CCD 平面上的真实物光复振幅 $O(x, y)$ 。从图中可以看出未完全消除的共轭像对再现像有着明显影响。

利用式 (9), (10) 式计算相移量, 得到 $\alpha = 1.65$ rad (四舍五入后的结果), 将此值作为初始值, 逐步改变 α 的值, 取步长为 0.01 rad, 利用 (5) 式分别计算 CCD 面上物光复振幅分布, 得到原物光场的复振幅分布, 代入式 (8) 得到强度偏差与 α 的函数关系, 如图 3 所示。根据此曲线的变化趋势, 迭代次数不超过十次就能得到实际相移值 $\alpha' = 1.58$ rad。

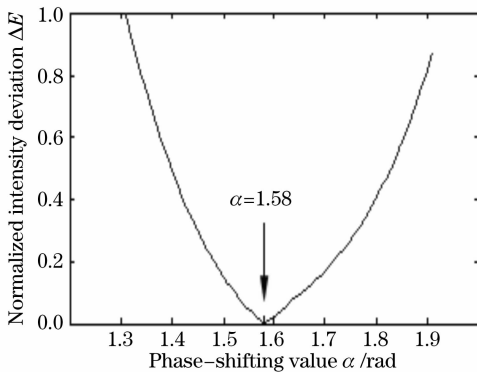


图 3 强度偏差与 α 的关系曲线

Fig. 3 Dependence of the intensity deviation on α

图 2(e) 是通过在再现过程中采用统计迭代法计算得到的真实相移值 α' 进行再现的结果。由图 2(e), 图 2(d) 可见, 当在再现过程中用所找到真正相移值 α' 去再现全息图时, 可以很好地消除零级衍射像及共轭像, 所得再现结果明显好于受到相移误差 $\Delta\alpha$ 干扰所得到的再现结果, 使得字符“大”清晰地出现在屏幕上。

然而从图 2(e) 中仍然可以看见衍射的杂光, 经实验研究分析, 并非是未完全消除的共轭像, 而是由于实验中光源不稳定、周围空气流动、实验台有微小振动等因素造成的。另外, 通过在真实相移值的临域内取值, 发现只有取真实值时再现像最清晰, 从而证实了基于相位统计特性迭代两步相移算法的正确性。

4 结 论

提出了基于相位统计特性的迭代算法, 并将其应用于同轴数字全息图的记录和再现。实验结果表明, 该方法能够有效地消除相移误差, 并得到了清晰的再现像, 证明了该方法的有效性。

参 考 文 献

- 1 J. W. Goodman, R. W. Lawrence. Digital image formulation from electronically detected holograms[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1967, **11**(3): 77~79
- 2 W. Osten, W. Jüptner. Measurement of displacement vector fields of extended objects[J]. *Opt. and Lasers in Engng.*, 1996, **24**(2-3): 261~285
- 3 S. Seebacher, W. Osten, W. Jüptner. Measuring shape and deformation of small objects using digital holography[C]. *Proc. SPIE*, 1998, **3479**: 104~115
- 4 S. Schedin, G. Pedrini, H. J. Tiziani *et al.*. Simultaneous three-dimension dynamic deformation measurements with pulsed digital holography[J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(34): 7056~7062
- 5 D. Lebrun, A. M. Benkouider, S. Coëtmelec *et al.*. Particle field digital holographic reconstruction in arbitrary tilted planes[J]. *Opt. Exp.*, 2003, **11**(3): 224~229
- 6 S. Schedin, G. Pedrini, H. J. Tiziani *et al.*. Highly sensitive pulsed digital holography for built-in defect analysis with a laser excitation[J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(1): 100~103
- 7 Feng Ying, Wu Ping, Cai Jing. Measuring direction of mechanical micro-deformation by laser holographic interferometry[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(2): 248~252
冯颖, 吴平, 蔡静. 利用激光全息干涉法测量微小机械变形方向[J]. *中国激光*, 2006, **33**(2): 248~252
- 8 Xu Ying, Zhao Jianlin, Fan Qi *et al.*. Determination of the poisson's ratio of material by digital holographic interferometry[J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(6): 787~790
徐莹, 赵建林, 范琦等. 利用数字全息干涉术测定材料的泊松比[J]. *中国激光*, 2005, **32**(6): 787~790
- 9 Lü Xiaoxu, Zhang Yimo, Zhong Liyun *et al.*. Analysis and experiment of phase-shifting coaxial lensless Fourier digital holograph[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(11): 1511~1515
吕晓旭, 张以谟, 钟丽云等. 相移同轴无透镜傅里叶数字全息的分析与实验[J]. *光学学报*, 2004, **24**(11): 1511~1515
- 10 Luo Peng, Lü Xiaoxu, Zhong Liyun. Recording and reconstruction of near-distance digital holography [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(10): 1735~1739
罗鹏, 吕晓旭, 钟丽云. 近距离数字全息术记录和再现问题[J]. *光学学报*, 2007, **27**(10): 1735~1739
- 11 Wang Huaying, Wang Guangjun, Zhao Jie *et al.*. Imaging resolution analysis of digital holographic microscopy[J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(12): 1670~1675
王华英, 王广俊, 赵洁等. 数字全息显微系统的成像分辨率分析[J]. *中国激光*, 2007, **34**(12): 1670~1675
- 12 I. Yamagnchi, T. Zhang. Phase-shifting digital holography[J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(16): 1268~1270
- 13 H. Kadono, S. Toyoka. Statistical interferometry based on the statistics of speckle phase[J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(12): 883~885