

文章编号: 1001-3806(2013)06-0723-05

采用二值化相位光瞳的光学扫描全息方法

姜雨甫, 周 昕*, 王 运, 郭雪帆
(四川大学 电子信息学院, 成都 610065)

摘要: 为了降低对随机相位板的精度要求, 提出在光学扫描全息系统中采用二值化相位光瞳对多层 3 维物体进行全息成像的方法, 进行了相关的理论分析和数值模拟。结果表明, 与采用连续随机相位光瞳函数的情况类似, 采用二值化相位光瞳也能在图像重构时有效地消除模糊的离焦层图像; 同时, 重构图像的质量与采用的二值随机相位光瞳的随机度有关, 当随机度不太低时, 可得到质量能接受的重构图像。这一结果对于降低实验条件的要求是有帮助的。

关键词: 全息; 光学扫描; 二值随机相位光瞳; 随机度; 随机相位编码

中图分类号: O438.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2013.06.004

Optical scanning holography based on a binary phase pupil

JIANG Yu-fu, ZHOU Xin, WANG Yun, GUO Xue-fan

(College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: In order to reduce the precision requirements of random-phase pupil, an optical scanning holography method using a binary random-phase pupil was proposed, which can be used to acquire the holographic information of a multi-section object. Series of theoretical analysis and numerical simulation were conducted. It is found that, similar as the optical scanning holography using a continuous random-phase pupil, the one using a binary phase pupil can also effectively eliminate the haze risen from the de-focus sections when the in-focus image is reconstructed. Furthermore, the reconstructed image quality has a close relationship with the degree of randomness on binary random-phase pupil, and an acceptable reconstructed image can still be obtained if randomness degree is not too low. This result is helpful for reducing the requirements of experimental conditions.

Key words: holography; optical scanning; binary random-phase pupil; randomness degree; random-phase encoding

引 言

光学扫描全息技术(optical scanning holography, OSH)在荧光成像、远距离遥感、图像识别和 3 维电视等领域都有很大的应用潜力^[1-4]。特别是 OSH 技术可以通过主动光学扫描, 使用单一的 2 维光学扫描就能快速地获得 3 维物体的全部信息, 因而其在全息荧光显微技术方面具有较大的优势, 但是它的重构图像往往与模糊的离焦层图像相混叠而影响观看。一些学者为此提出了多种滤除离焦层图像的方

法^[5-11], 例如: 维纳滤波^[5]与维格纳滤波^[6]是图像处理中最普遍的方法, 然而它们受制于需要假设 OSH 系统中物体处于最理想情况; 逆成像技术^[7]可以一次重构所有切片图像并且消除离焦层噪声, 但它往往存在会丢失局部图像信息的问题; 相移法^[8]可以有效地消除零级像和共轭像, 并提高数字全息重构图像的质量, 但相移法需要采集多幅全息图, 不利于动态测量; 边缘保留方法^[9]、自适应迭代压缩阈值算法^[10]、边缘检测^[11]、自聚焦^[12]等方法则需要复杂的运算。总的来说, 多数方法的计算量都比较大。

最近, 一种基于随机相位编码原理的光学扫描全息层析成像方法被提出来^[13], 该方法是将 OSH 系统的记录和重构过程看作编码和解码过程, 即把随机相位光瞳函数及 OSH 系统纵向位置参量都看作是系统密钥, 使数字重构时的解码函数对纵向位置有很强的依赖性。因此, 在数字重构时只有聚焦

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61177009); 教育部留学回国人员科研启动基金资助项目

作者简介: 姜雨甫(1987-), 男, 硕士研究生, 现从事光电信息处理方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: zhoxn985@sohu.com

收稿日期: 2013-03-12; 收到修改稿日期: 2013-04-23

层能被正确还原,而离焦层图像则以随机噪声的形式被滤除。这种方法的关键在于通过相位迭代算法,寻找满足一定条件的随机相位光瞳分布函数。这样的随机相位分布函数往往具有较宽的取值范围,在实际中则需要精细度很高的随机相位板来实现。

本文中,作者提出在 OSH 系统中采用二值化随机相位光瞳,这样可在降低对随机相位板精度要求的同时,也能重构出质量可接受的图像。

1 基于随机相位编码的光学扫描全息技术

光学扫描全息技术是一种基于双光瞳成像系统的方法,主要包括主动光学扫描和光外差法两方面。如图 1 所示,频率为 ω_0 和 $\omega_0 + \Omega$ 的两束光分别通过光瞳 $p_1(x, y)$ 和 $p_2(x, y)$, 然后经过分光镜 (beam splitter, BS) 聚焦到 2 维扫描镜上,对多层 3 维物体进行扫描。光电探测器 (photo defector, PD) 接收所有的光线并输出一个差频电信号 $i(x, y)$, 经过带通滤波器 (band pass filter, BPF) 后输出一个交流分量 $i_{\Omega}(x, y)$ 。外差电信号分成两路输出通道,分别乘以频率为 Ω 的余弦和正弦信号,然后通过低通滤波 (low pass filter, LPF) 提取外差电信号的相位信息,输出 $i_{\cos}(x, y)$ 和 $i_{\sin}(x, y)$ 并存储在计算机中。最终,整个 OSH 系统的输出结果为 $i(x, y) = i_{\cos}(x, y) + ji_{\sin}(x, y)$ [1]。

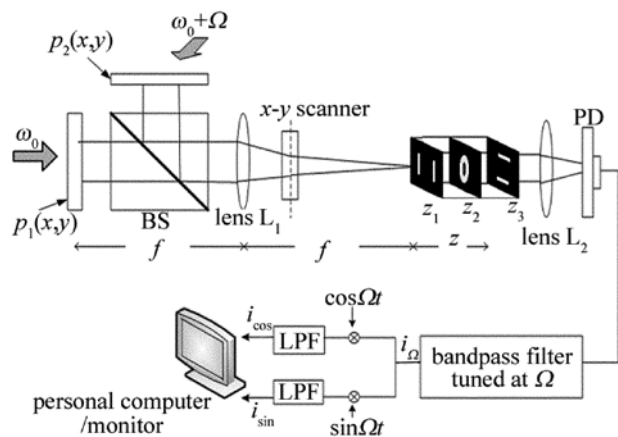


Fig. 1 Schematic of OSH system

整个系统工作由两部分组成,即编码过程和解码过程,系统最终输出结果可表示为 [12]:

$$i_{\text{out}}(x, y) = \mathcal{F}^{-1} \left\{ \mathcal{F} [I(x, y; z_c)] \cdot O_{\Omega}(k_x, k_y; z_c) \cdot O_{\Omega}(k_x, k_y; z_d) \right\} \quad (1)$$

式中, I 表示光强, $O_{\Omega}(k_x, k_y; z)$ 是光学扫描全息的光

传递函数:

$$O_{\Omega}(k_x, k_y; z) = \exp \left[j \frac{z}{2k_0} (k_x^2 + k_y^2) \right] \times \iint p_1^*(x', y') p_2 \left(x' + \frac{f}{k_0} k_x, y' + \frac{f}{k_0} k_y \right) \times \exp \left[j \frac{z}{f} (x' k_x + y' k_y) \right] dx' dy' \quad (2)$$

式中, f 表示焦距, \mathcal{F} 与 \mathcal{F}^{-1} 分别表示傅里叶变换和傅里叶逆变换, 上标 $*$ 表示复共轭, k_0 为波数, k_x 和 k_y 是空间频率。在编码与解码过程中的 $p_1(x, y)$, $p_2(x, y)$, z 分别用 p_{1c}, p_{2c}, z_c 与 p_{1d}, p_{2d}, z_d 表示, 即下标 c 和 d 分别表示编码过程和解码过程。

在传统的 OSH 方法中, 编码光瞳函数取为 $p_{1c}(x, y) = \delta(x, y)$ 和 $p_{2c}(x, y) = 1$, 而解码光瞳函数取为 $p_{1d}(x, y) = 1$ 和 $p_{2d}(x, y) = \delta(x, y)$ 。由 (1) 式可得 [1]:

$$i_{\text{out}}(x, y) = \mathcal{F}^{-1} \left\{ \mathcal{F} [I(x, y; z_c)] \exp \left[j \frac{z_d - z_c}{2k_0} (k_x^2 + k_y^2) \right] \right\} \quad (3)$$

从 (3) 式可看出, 当 $z_c = z_d$ 时, 聚焦层图像能够被完全复原, 而当 $z_c \neq z_d$ 时, 离焦层图像表现为一幅模糊的重构图像。

在基于随机相位编码的 OSH 方法中 [12], 采用的编码光瞳函数为 $p_{1c}(x, y) = \exp [j2\pi s(x, y)]$, $p_{2c}(x, y) = 1$, 其中, $s(x, y)$ 为取值范围在 $[0, 1]$ 间均匀分布的随机数。在其解码过程中, 光瞳函数为 $p_{1d}(x, y) = 1, p_{2d}(x, y)$ 可以根据相位迭代算法确定, 并满足条件:

$$p_{1c}^*(-x, -y) \cdot p_{2d}(x, y) = 1 \quad (4)$$

且有:

$$P_{1c}^* \left(-\frac{z_i}{f} k_x, -\frac{z_i}{f} k_y \right) \cdot P_{2d} \left(\frac{z_d}{f} k_x, \frac{z_d}{f} k_y \right) = 1 \quad (5)$$

式中, P_{1c} 和 P_{2d} 分别为 p_{1c} 和 p_{2d} 的傅里叶变换, z_i 为多层 3 维物体第 i 层所在的位置。则有:

$$i_{\text{out}}(x, y) = \sum_{z_i} \mathcal{F}^{-1} \left\{ \mathcal{F} \{ I(x, y; z_i) \} \times P_{1c}^* \left(-\frac{z_i}{f} k_x, -\frac{z_i}{f} k_y \right) \cdot P_{2d} \left(\frac{z_d}{f} k_x, \frac{z_d}{f} k_y \right) \cdot \exp \left[j \frac{z_d - z_i}{2k_0} (k_x^2 + k_y^2) \right] \right\} \quad (6)$$

可见, 当 $z_i \neq z_d$ 时, (6) 式的输出为随机函数, 即 z_i 与 z_d 距离足够远时, 离焦图像层将以“散斑”状噪声的形式叠加在重构的聚焦层图像上。

这样确定的光瞳函数是幅值为 1、相位从 0 到

2π 随机取值的复函数。在实际中需要制作精度很高的随机相位板或采用高精度的空间光调制器才能实现。如果能够使光瞳函数的取值二值化,即相位取值范围只有 0 和 π 两种,则对实验条件的要求将大大降低。

2 二值化随机相位光瞳

2.1 二值化随机相位光瞳的偏离方差

二值化随机相位光瞳的每一个像元按等概率取值为 0 或 π ,显然,这样的相位光瞳函数将不能满足(5)式中所描述的系统最理想情况,因而在重构出聚焦层图像同时也将出现噪声。因为当系统采用二值化随机相位光瞳时,即使在 $z_i = z_d$ 处,仍有:

$$P_{1c}^* \left(-\frac{z_d}{f} k_x, -\frac{z_d}{f} k_y \right) \cdot P_{2d} \left(\frac{z_d}{f} k_x, \frac{z_d}{f} k_y \right) = 1 + \Delta S(k_x, k_y) \quad (7)$$

式中, $\Delta S(k_x, k_y) \neq 0$, 表示函数 $P_{1c}^* \cdot P_{2d}$ 偏离固定值 1 的分布函数。由(5)式可知,如果 ΔS 存在,则说明即使满足 $z_i = z_d$ 时,重建出的聚焦层图像上也将会附加有噪声。并且, ΔS 越大,即(7)式偏离理想情况的(5)式越远,则叠加在重建图像上的噪声也将越大。

可以用方差值来表征(7)式偏离理想情况的程度,其定义为:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N [\Delta S(i, j)]^2}{N \cdot N} \quad (8)$$

式中, N 为 i, j 最大值。因此,对于一个给定的编码相位光瞳函数 p_{1c} , 可以通过(4)式得到与其对应的解码光瞳函数 p_{2d} , 以及它们的傅里叶变换 P_{1c} 和 P_{2d} 。然后通过(7)式和(8)式,可以用偏离方差 σ^2 来反映重构的聚焦层图像的质量。

2.2 二值化随机相位光瞳的随机度

上述二值化随机相位光瞳的每一个像元都是按等概率取值的,即每个像元的值都与相邻像元值无关。如果以随机度来描述二值化随机相位光瞳中每个像元取值的相关性,则这样的二值化随机相位光瞳的随机度也是最大的。如果随机度改变,例如每个像元取值与其相邻像元有关系,那么重构结果也许会有一些变化。

做如下定义:一个元素可以包含几个像元,并且其中每个像元的取值相同(0 或 π),但是每个元素相互间又是按等概率随机取值的。因此在上述模拟

中,一个元素仅仅包含一个像元,定义它的元素面积(element area, EA)为 1。如果一个元素包含 2×2 个像元,定义它的元素面积为 4,以此类推。显然,元素面积越大,二值化随机相位光瞳的随机度就越小,因为更多的像元因其相邻像元的值而取确定值。

3 数值模拟结果及分析

3.1 二值化随机相位光瞳的重构结果

做如下数值模拟,如图 2a 所示,构成多层物体的 3 层图像的纵向位置分别为 $z_1 = 9\text{mm}$, $z_2 = 10\text{mm}$ 和 $z_3 = 11\text{mm}$ 。随机选择一块二值相位光瞳作为 $p_{1c}(x, y)$, 并由(4)式得到与其相应的 $p_{2d}(x, y)$ 。模拟中,两个光瞳的尺寸为 $2\text{cm} \times 2\text{cm}$ (1024 像元 \times 1024 像元),激光波长为 $0.6328\mu\text{m}$,透镜焦距 $f = 10\text{cm}$ 。

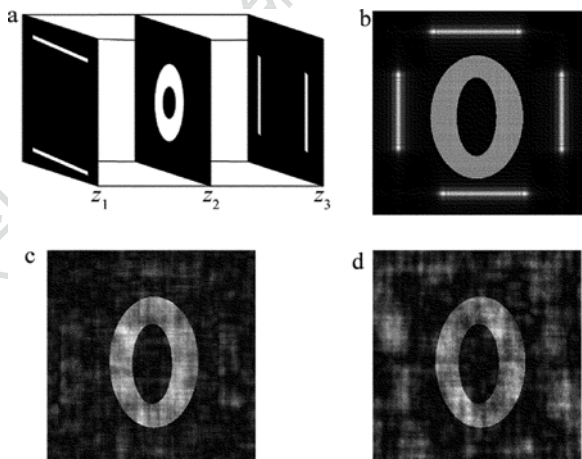


Fig. 2 a—multi-section object b—reconstructed images at section z_2 c—reconstructed images by traditional OSH d—continuous and binary random-phase pupils

图 2b 是采用传统 OSH 技术重构的 z_2 处图像;图 2c 和图 2d 则分别为采用连续和二值随机相位光瞳函数时 z_2 处的重构效果。可见,二值与连续随机相位光瞳两者都能有效地消除传统 OSH 方法中的模糊离焦层图像。但是,图 2d 中“散斑”状噪声比图 2c 中更大,而且图像质量也更差些。这是因为图 2d 的“散斑”状噪声来源除 z_1 和 z_3 层外,还有来自(7)式中的 ΔS 。由(5)式、(7)式和(8)式,计算所选二值随机相位光瞳偏差分布函数 $\Delta S(k_x, k_y)$,得到该二值相位板对应的偏离方差 $\sigma^2 = 1.0018$ 。

再任意选择 100 个二值随机相位光瞳,并得到它们的偏离方差,这些光瞳函数中二值像元的取值也都满足均匀随机概率分布。如图 3 所示,所选光瞳函数的偏离方差范围大致在 0.99 ~ 1.01 之间,集

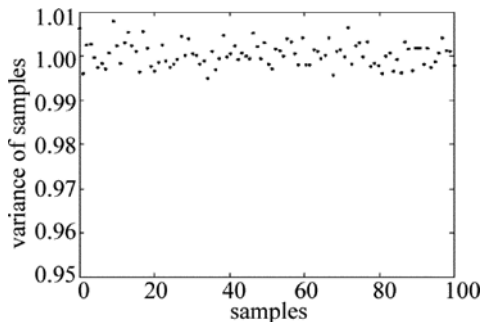


Fig. 3 Range of deviation variances for 100 binary random-phase pupils 中在 $\sigma^2 = 1$ 附近的窄带范围内。而且模拟结果表明,采用这些光瞳得到的重构图像也与图 2b 相似。这表明,在基于随机相位编码的 OSH 系统中,随机选取一块二值相位板作为光瞳函数,因其偏离方差集中在一个很窄的范围内,所以都能得到一个相似的质量可接受的重构图像。

3.2 改变二值化随机相位光瞳随机度的影响

图 4a ~ 图 4d 分别是二值化光瞳元素面积 A 为 4, 16, 64 与 256 时的重构图像,而图 2d 为二值化光瞳元素面积为 1 时的重构图像。可以看出,随着随机度的降低、元素面积的增加,聚焦层图像与“散斑”状噪声变得更加的模糊扭曲,重构图像的质量很明显地逐渐变差。与此相应的,得到这 5 种情况下,所用二值随机相位光瞳的偏离方差 σ^2 分别为 1.0018, 3.5156, 14.0374, 57.7462 与 234.7331。

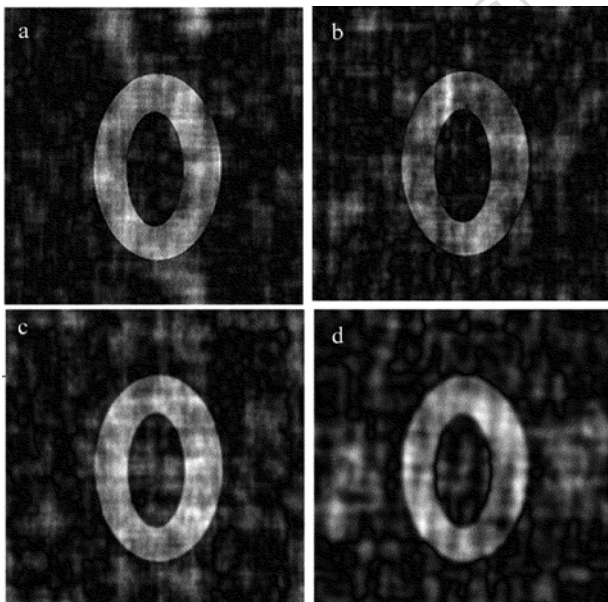


Fig. 4 Reconstructed images by binary pupils with pixel size 4, 16, 64 and 256, respectively

取更多的二值化随机相位光瞳来验证上述模拟结果。图 5a 中描述了任意选择元素面积 A 分别为

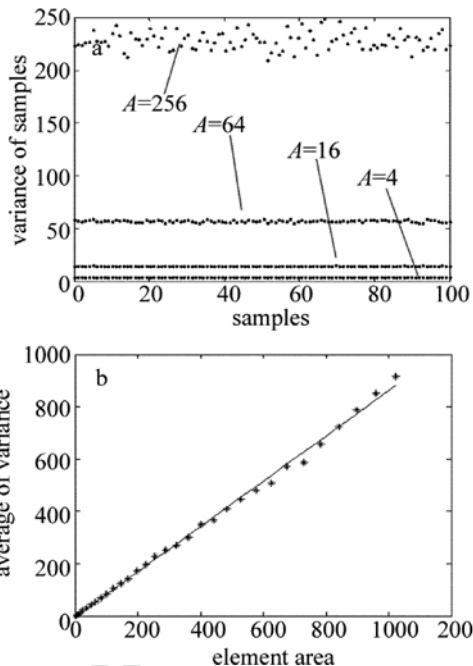


Fig. 5 a—range of deviation variances for 100 binary random-phase pupils when $A=4, 16, 64, 256$, respectively b—plot of average variance value versus element area

4, 16, 64 与 256 的二值化随机相位光瞳各 100 块,计算其偏离方差的分布范围。可见,随着元素面积的增大,方差取值范围变宽。图 5b 是不同元素面积与其相应方差平均值的关系图。根据模拟结果可知,当元素面积超过 64 时,重构图像的质量将变得不能接受。这表明,二值化随机相位光瞳的随机度与其重构图像的质量有密切关系,随着随机度的降低,重构图像的质量将逐渐变差,当随机度降低到一定程度时,重构图像将不能用于实验观察。

4 小 结

数值模拟了在基于随机相位编码的 OSH 系统中,采用二值随机相位光瞳对多层 3 维物体进行数字图像重构。结果表明,采用二值化光瞳同样也可以有效地消除离焦层噪声,并且重构图像质量与二值化光瞳的随机度有关。如果随机度不太低,仍然能够获得可接受的重构图像。

参 考 文 献

- [1] POON T C. Optical scanning holography with MATLAB [M]. New York, USA: Springer, 2007: 65-96.
- [2] INDEBETOUW G, ZHONG W W. Scanning holographic microscopy of three-dimensional fluorescent specimens [J]. Journal of the Optics Society of America, 2006, A23(7): 1699-1707.
- [3] POON T C, KIM T. Optical image recognition of three-dimension-

- al objects [J]. *Applied Optics*, 1999, 38(2):370-381.
- [4] POON T C. Three-dimensional television using optical scanning holography [J]. *Journal of Inform Display*, 2002, 3(3):12-16.
- [5] KIM T. Optical sectioning by optical scanning holography and a wiener filter [J]. *Applied Optics*, 2006, 45(5):872-879.
- [6] KIM H, MIN S W, LEE B, *et al.* Optical sectioning for optical scanning holography using phase space filtering with Wigner distribution functions [J]. *Applied Optics*, 2008, 47(19): D164-D175.
- [7] ZHANG X, LAM E Y, POON T C. Reconstruction of sectional images in holography using inverse imaging [J]. *Optics Express*, 2008, 16(22):17215-17226.
- [8] HOU R N, YAN Y F. The zero-order image and conjugate image elimination method of off-axis digital hologram [J]. *Laser Technology*, 2012, 36(5):632-635(in Chinese).
- [9] ZHANG X, LAM E Y. Edge-preserving sectional image reconstruction in optical scanning holography [J]. *Journal of the Optics Society of America*, 2010, A27(7):1630-1637.
- [10] ZHAO F J, QU X C, ZHANG X, *et al.* Solving inverse problems for optical scanning holography using an adaptively iterative shrinkage-thresholding algorithm [J]. *Optics Express*, 2012, 20(6):5942-5954.
- [11] TSANG P W, CHEUNG K W, KIM T, *et al.* Fast reconstruction of sectional images in digital holography [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(14):2650-2652.
- [12] KIM T, POON T C. Autofocusing in optical scanning holography [J]. *Optics Letters*, 2009, 48(34):H153-H159.
- [13] ZHOU X, DOBSON K, SHINODA Y, *et al.* Sectional image reconstruction in optical scanning holography using a random-phase pupil [J]. *Applied Optics*, 2010, 35(17):2934-2936.

《激光技术》编辑部

版权所有 ©