

基于空间光调制器的非相干数字全息单次曝光研究

白云鹤 臧瑞环 汪盼 荣腾达 马凤英 杜艳丽 段智勇 弓巧侠

Single-shot incoherent digital holography based on spatial light modulator

Bai Yun-He Zang Rui-Huan Wang Pan Rong Teng-Da Ma Feng-Ying Du Yan-Li Duan Zhi-Yong
Gong Qiao-Xia

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 67, 064202 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20172127

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20172127>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I6>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于数字全息图的光纤折射率测量研究](#)

Refractive Index Measurement Research for Optical Fiber Based on Digital Hologram

物理学报.2015, 64(6): 064204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.064204>

[数字全息术测定涡旋光束拓扑电荷数](#)

Measuring topology charge of vortex beam using digital holography

物理学报.2014, 63(24): 244202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.244202>

[像面数字全息的重建相位误差分析和改善](#)

Analysis and improvement of reconstruction phase error in the image plane digital holography

物理学报.2014, 63(24): 244201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.244201>

[基于多角度无透镜傅里叶变换数字全息的散斑噪声抑制成像研究](#)

Research on speckle denoising by lensless Fourier transform holographic imaging with angular diversity

物理学报.2014, 63(15): 154205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.154205>

[双Lloyd镜数字全息显微测量术](#)

Digital holographic microscope employing dual-Lloyd's mirror

物理学报.2014, 63(10): 104207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.104207>

基于空间光调制器的非相干数字全息 单次曝光研究*

白云鹤 臧瑞环 汪盼 荣腾达 马凤英 杜艳丽 段智勇 弓巧侠†

(郑州大学物理工程学院, 郑州 450001)

(2017年9月26日收到; 2017年11月28日收到修改稿)

菲涅耳非相干相关全息术 (Fresnel incoherent correlation holography, FINCH) 利用在空间光调制器 (spatial light modulator, SLM) 上加载双透镜模式对同一物点光分束自相干, 并通过改变加载的相位因子得到不同的相移全息图. 本系统利用 SLM 可分区编码调制特性, 将 FINCH 成像中 SLM 上分三次加载的 0° , 120° , 240° 相位双透镜掩模各提取 $1/3$ 组成一幅复合相移模式加载, 并研究了三种相位分布方式对 FINCH 成像质量的影响. 结果表明: 三个相位在 SLM 上分布间隔越大, 再现像越清晰. 在此基础上, 提出了一种新的掩模加载方式, 在 SLM 加载透镜阵列, 每一个相位因子对应一个双透镜, 具有一个光轴. 实验表明, 通过这种加载方式, 通过 SLM 后形成的三个相移图能够一次在电荷耦合器上记录, 并且三个相移图不重叠, 然后通过 MATLAB 编程计算将不同相移角度的全息图分别提取出来, 通过三步相移计算合成一幅包含有物光波的复值全息图, 最后通过数值再现算法重建待测样品. 此系统可用于对光源相干性较低的实时成像系统, 也为微小形变测量、动态物体的观测提供了新方法, 为非相干数字全息术的发展提供了新思路.

关键词: 全息术, 非相干数字全息, 单次曝光, 空间光调制器

PACS: 42.40.-I, 42.40.Eq, 42.40.Ht, 42.40.Jv

DOI: 10.7498/aps.67.20172127

1 引言

近年来, 随着计算机、高分辨率电荷耦合器 (CCD) 和空间光调制器 (SLM) 的发展, 数字全息术 [1-4] 受到越来越多的关注, 同时非相干光源照明的数字全息也展现了其独特的魅力. 非相干数字全息术是利用非相干光源实现记录并通过数值再现方法重构出原始物体全部信息的一种方法. Rosen 和 Brooker [5-7] 提出菲涅耳非相干相关全息术 (Fresnel incoherent correlation holography, FINCH), 该技术是一种单通道、非扫描、无运动的快速记录三维物体的非相干全息方法, 只需获取被观察物体的三幅全息图即可再现出该三维物体. 在光源要求上, FINCH 适用于白光、荧光等各种光源,

突破了传统数字全息对光源相干性的要求. 在记录过程中, FINCH 技术通过加载到 SLM 上的掩模 [8] 对物体发出的光进行分束自相干, 从而记录物体的信息, 产生自干涉菲涅耳全息图. FINCH 技术是物光和参考光同轴共路结构, 实验装置的稳定性高, 而且 SLM 前置不同光路, 可以实现不同功能的成像, 如近几年发展起来的反射白光全息成像 [9-11], 三维 (3D) 荧光物体的多色全息成像 [6], 3D 荧光显微和高分辨率的合成孔径成像 [12-14] 等. FINCH 采用的是三步相移技术, 不利于活体细胞和运动速度快的样品的记录, 所以单次曝光同轴相移数字全息技术引起了更多研究人员的关注, 如华南农业大学翁嘉文等 [15] 将数字全息数值重构算法与压缩感知理论相结合, 实现了基于发光二极管的单幅弱相

* 河南省高等学校重点科研项目 (批准号: 16A140035) 和 2018 年度河南省高校科技创新团队 (批准号: 18IRTSTHN016) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: gqx1205@zzu.edu.cn

干光的数字全息图数值重建, 同时可以抑制孪生像以及相干噪声带来的干扰, 可用于动态物体的观测与记录, 但是会产生对比度的损失, 不能很好地保持图像的小尺度特征, 并且在再现的过程中需要进行多次迭代, 所以需要运行的时间倍增. 南京师范大学的朱竹青等^[16]提出的瞬时相移数字全息原理, 利用SLM相位调制特性, 对基于迈克耳孙干涉光路的参考光一步实现四种相位延迟, 获取了含有四种相移信息的单幅复合数字全息图, 再通过插值运算得到四幅相移子全息图, 其过程较为复杂, 且要求SLM与CCD的像素尺寸和像素个数分别相等. 本文给出了一种单次曝光实现同轴全息记录的方法, 在FINCH光路基础上, 利用SLM的可分区编码调制特性, 在SLM上同时加载多步相移, 通过一次记录获得含有多步相移信息的单幅复合数字全息图; 并提出了在SLM加载透镜阵列模式的概念, 将SLM整个幅面分成三部分, 每部分对应加载双透镜模式, 相位因子分别是 0° , 120° , 240° , 由于是三个独立的双透镜系统, 所以SLM上不同幅面出射的光能够在CCD分开, 一次记录获得三步在空间上分开的相移全息图, 子相移全息图通过简单MATLAB编程就能提取, 实现了非相干数字全息的单次曝光.

2 FINCH 成像原理

图1是FINCH成像示意图, 计算它的成像过程不考虑成像范围以及光束宽度的限制, 视为理想的成像系统. 假设携带有物体信息的空间任意一点 $O(x_s, y_s, z_s)$, 经过空间自由传播和透镜变换及SLM(加载透镜焦距为 f_{d1} 和 f_{d2} 双透镜进行分波)的分波, 根据波动光学理论可以得到CCD表面的振幅分布为^[8]

$$\left[C(\mathbf{r}_s, z_s) L\left(\frac{-\mathbf{r}_s}{z_s}\right) Q\left(\frac{1}{z_s}\right) Q\left(-\frac{1}{f_0}\right) * Q\left(\frac{1}{d}\right) \right] \times \left[B \exp(i\theta) Q\left(\frac{-1}{f_{d1}}\right) + B' Q\left(\frac{-1}{f_{d2}}\right) \right] * Q\left(\frac{1}{z_h}\right), \quad (1)$$

其中,

$$L(\mathbf{r}_s) = \exp[i2\pi\lambda^{-1}(x_s x + y_s y)], \quad (2)$$

$$Q(b) = \exp[i\pi b \lambda^{-1}(x^2 + y^2)], \quad (3)$$

$$C(\mathbf{r}_s, z_s) = \exp[i\pi(z_s \lambda)^{-1}(x_s^2 + y_s^2)]. \quad (4)$$

式中, λ 为波长, \mathbf{r}_s 在 x 和 y 轴方向的分量分别为 x_s 和 y_s , $C(\mathbf{r}_s, z_s)$ 是和点源位置相关的复常数.

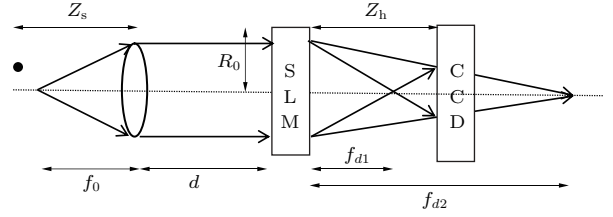


图1 FINCH 成像示意图

Fig. 1. Schematic diagram of FINCH imaging system.

由于CCD只能记录光场的强度分布, 那么由(1)式复振幅分布可得出在CCD上记录的光强分布, 即点源全息图, 也称为系统的强度点扩散函数^[17]:

$$I_p(x, y; \mathbf{r}_s, z_s) = C + C_1 \exp \left\{ \frac{i\pi}{\lambda z_r} [(x - M_T x_s)^2 + (y - M_T y_s)^2] + i\theta \right\} + \text{c.c.} \quad (5)$$

其中 C, C_1 为复常数; c.c.为等号右侧第二项的复共轭; M_T 为系统的垂轴放大率, z_r 为再现距离. (5)式是点源全息图, 而在CCD上记录的应该是物体表面所有点源全息图的非相干叠加, 因采用的是反射式全息, 若设物体表面反射强度分布为 $g(x_s, y_s, z_s)$, 则可以得到整幅全息图的光强分布为^[17]

$$H(x, y) = \iiint g(x_s, y_s, z_s) I_p(x, y, \mathbf{r}_s, z_s) dx_s dy_s dz_s = C \iiint g(x_s, y_s, z_s) dx_s dy_s dz_s + C_1 \iiint g(x_s, y_s, z_s) \exp \left\{ \frac{i\pi}{\lambda z_r} [(x - M_T x_s)^2 + (y - M_T y_s)^2] + i\theta \right\} dx_s dy_s dz_s + \text{c.c.}, \quad (6)$$

式中等号右侧第一项代表的是干涉图案的背景信息的零级像, 第二项代表物体虚像信息, 第三项为实像信息. 使用三步相移^[18]的方法, 只保留有实像信息的最终全息图 $H_F(x, y)$,

$$H_F(x, y) = \sum_{n=1}^N \frac{H_n(x, y) \exp(i2\pi n/N)}{N}$$

$$= C_1 \iiint g(x_s, y_s, z_s) \exp \left\{ \frac{-i\pi}{\lambda z_r} [(x - M_T x_s)^2 + (y - M_T y_s)^2] \right\} dx_s dy_s dz_s. \quad (7)$$

接下来是通过计算机模拟衍射过程进行再现,使用的算法是角谱衍射算法^[19],最终得到再现像为

$$S(x, y, z) = F^{-1} \left\{ F[H(x, y)] \times \exp \left[ikz_r \sqrt{1 - \lambda^2 (f_x^2 + f_y^2)} \right] \right\}. \quad (8)$$

3 实时动态单次曝光模拟和实验

3.1 模拟仿真

图2为采用图1所示FINCH系统单次曝光成像模拟实验结果.模拟的条件为:原始二

值图像,黑底白字,字为“郑州大学”,图片尺寸4 mm × 4 mm; $z_s = 400$ mm, $f_0 = 250$ mm, $z_h = 250$ mm, $d = 135$ mm, $f_{d1} = 245$ mm, $f_{d2} = 255$ mm; CCD像素数512×512,像素尺寸8 μm;记录波长为632.8 nm.图2(a)是模拟在SLM上同时加载三个相移因子的掩模,模拟出三幅相移子全息图,并将子全息图进行三步相移计算,合成一幅包含有物光波的复值全息图,通过数值再现算法重建得到再现像图2(b),图2(c)为原图.由图2可以看出,在SLM上同时加载三个相位因子进行全息记录,对三个相位对应的子全息图再应用三步相移去除孪生像及直流项,利用角谱衍射法再现,能得到较为清楚的再现物体,说明在SLM同时加载三步相位,如果能够将三个子全息图分开记录,能够实现非相干数字全息的单次曝光记录.

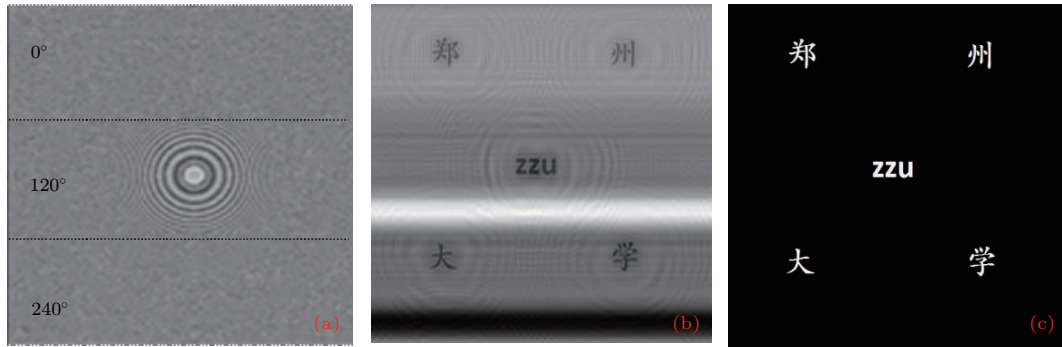


图2 FINCH系统单次曝光成像模拟实验结果 (a) SLM上同时加载三个相移因子的掩模; (b) 再现像; (c) 原图
Fig. 2. Single exposure imaging simulation results of FINCH system: (a) The mode with three phase shift factors on SLM; (b) the reconstructed image; (c) the original image.

3.2 实验

搭建如图3所示的非相干光反射式数字全息记录实验光路,使用连续的白光光谱光源(CELTCX250, 250 W),BF为窄带滤光片(中心波长632.8 nm,带宽20 nm),L1为焦距是60 mm的凸透镜,L2为焦距是250 mm的凸透镜,BS为分束器,用(USAF 1951)分辨率板作为测试物体,SLM (Holoeye Pluto, 1920 pixel×1080 pixel)根据实验要求加载不同功能的掩模,CCD (Hamamatsu Digital Camera C8484-05, 1344 pixel×1024 pixel)的像素大小为6.45 μm,拍摄时使用的像素点为1024×1024,在记录过程中各个器件之间的距离分别为:待测物体到L2的距离为250 mm,BS2到SLM的距离加上BS2到CCD的距离之和

是250 mm,透镜到SLM的距离是140 mm.

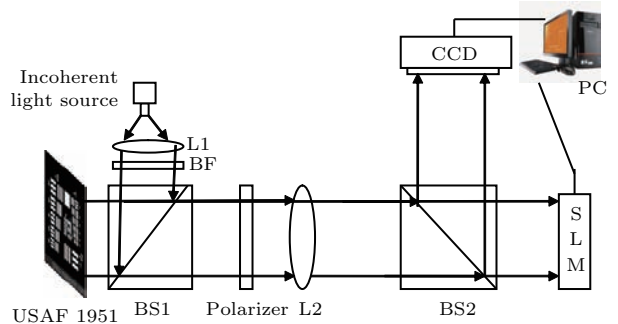


图3 非相干光反射式数字全息记录实验光路
Fig. 3. Experimental light path of incoherent light reflection digital holographic recording.

将如图4(a)—(c)分别对应的0°, 120°, 240°相位掩模从上到下依次提取1/3,合成了一幅复合相移掩模,如图4(d)所示,并进行FINCH记录及再

现,再现像如图 4(e). 与只加载一个相位的双透镜模式的再现像图 4(f) 进行对比,结果表明,在 SLM 上只加载一步相位模式,得到的再现像质量不如在 SLM 同时加载三步相移模式,说明在 SLM 同时加

载不同相移模式具有一定相移作用,能够提高再现像质量,在此基础上,进一步考虑三种相移模式在 SLM 上分布方式对成像质量影响,如图 5 所示.

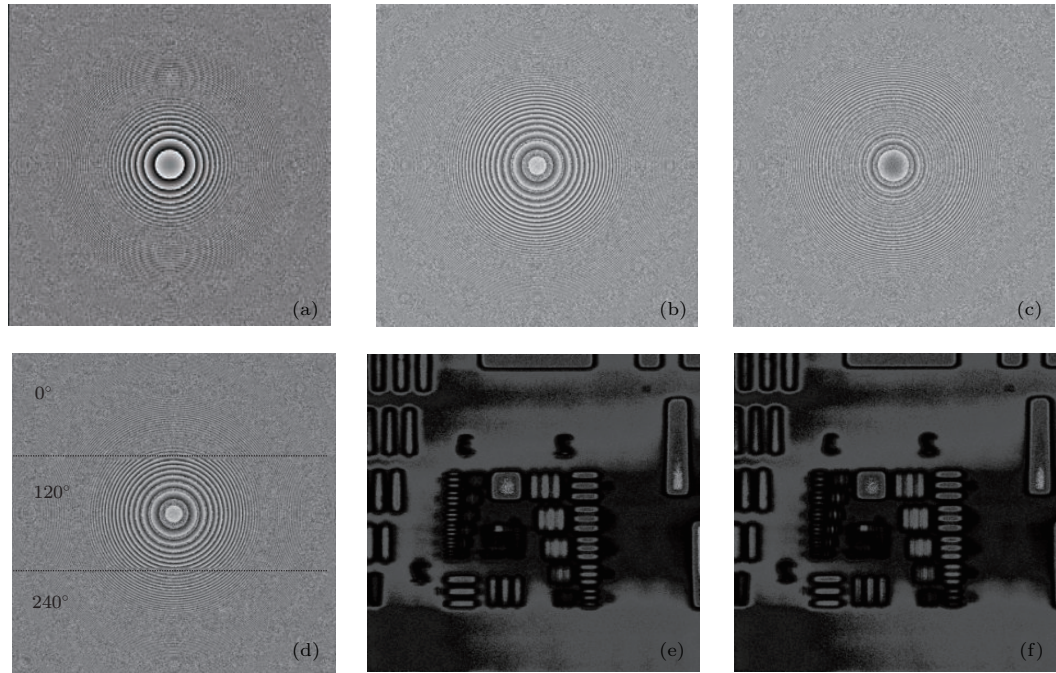


图 4 (a) SLM 上加载 0° 相位掩模; (b) SLM 上加载 120° 相位掩模; (c) SLM 上加载 240° 相位掩模; (d) SLM 分区同时加载 0° , 120° , 240° 相位掩模; (e) 加载 (d) 模式单次曝光再现像; (f) 加载 (a) 模式单次曝光再现像
 Fig. 4. (a) Dual-lenses mode with 0° phase factor on the SLM; (b) dual-lenses mode with 120° phase factor on the SLM; (c) dual-lenses mode with 240° phase factor on the SLM; (d) dual-lenses mode with 0° , 120° , 240° phase factor on the SLM; (e) loading (a) reconstruction image corresponding to (d) mode; (f) reconstruction image corresponding to (a) mode.

我们进一步研究了 SLM 上加载的不同分区域相位模式对再现像质量的影响,如图 5 所示. 实验结果表明: 0° , 120° , 240° 三种相位在 SLM 上分布间距越大,再现像质量越好,因为它们对应的单步相移子全息图在 CCD 所处的位置越能分开,有利于后续用三步相移法去除零级项及孪生项. 实验中只用了 SLM 的 1024×1024 像素单元,对分辨率板成像,虽然细节不清楚,但分辨率板大致轮廓可以呈现. 说明通过调控 SLM 加载相移的编码方式,能够实现 FINCH 的单次曝光.

图 5 为 SLM 相移分布模式对再现像质量影响. 其中: (a₁) 0° , 120° , 240° 相位以像元为周期排列; (b₁) 0° , 120° , 240° 相位以一行作为周期排列; (c₁) 0° , 120° , 240° 相位以一列为周期排列; (d₁) 0° , 120° , 240° 相位从中心环形排列; (e₁) 0° , 120° , 240° 相位以三行为周期排列; (f₁) 0° , 120° , 240° 相位以三列为周期排列; (g₁) 0° , 120° , 240° 相位均分 SLM 三

等份排列; (h₁) SLM 加载单一相位; (a₂)—(h₂) 分别是 (a₁)—(h₁) 再现像中划红线部分所对应的强度分布. 从上面八张再现像及在划红线处对应的强度分布图可以看到,当三个相位因子间隔越小时,成像质量越差,峰越杂乱无章,有的地方光强度较小,甚至为零. 图 5(a) 模式是以像元为周期排列,各个相位因子间隔最小,成像质量最差,随着间隔的增大,图 5(e₁),图 5(f₁) 间距是图 5(b₁),图 5(c₁) 的三倍,我们可以看出细节相对越来越明显,说明成像质量越来越高. 而当 SLM 整个幅面分成三大块,如图 5(d₁),图 5(g₁),成像质量进一步增加. 另外,比较图 5(d₁) 和图 5(g₁) 两种成像方式,都是将相位分成三大块排列,图 5(d₁) 是相位沿径向排布时,根据面积划分成三个区域,图 5(g₁) 是直角坐标系下沿一个维度变化,可以看出图 5(g₁) 的成像效果更好.

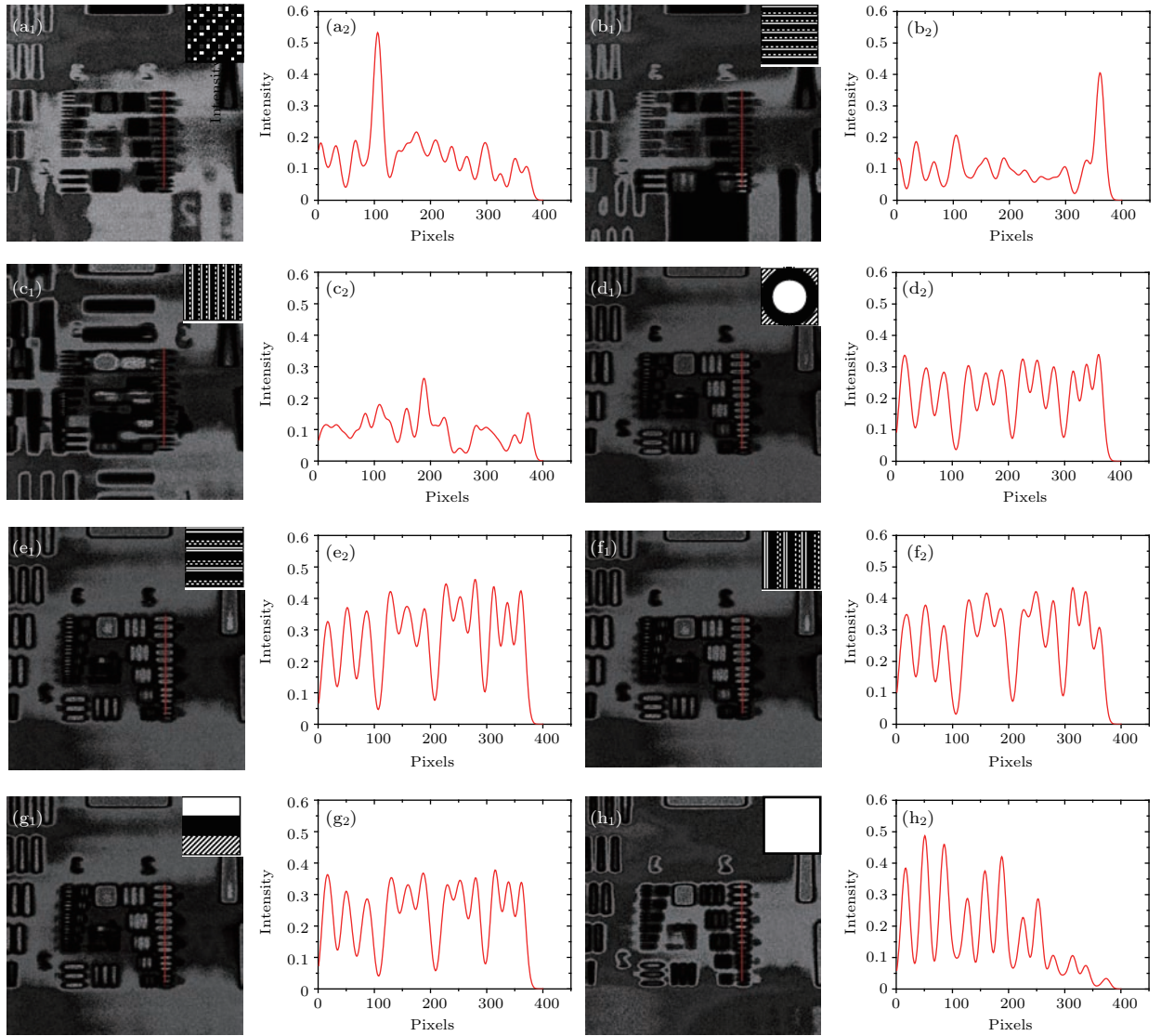


图5 加载到SLM上不同模式下的再现像及在红线位置处的强度变化 (内嵌图中白色对应 0° 、黑色对应 120° 、斜纹对应 240°)
 Fig. 5. Reconstruction image and intensity distribution at the position of the red line under different modes on the SLM (in the embedded map, the white corresponds to 0° ; the black corresponds to 120° ; the twill corresponds to 240°).

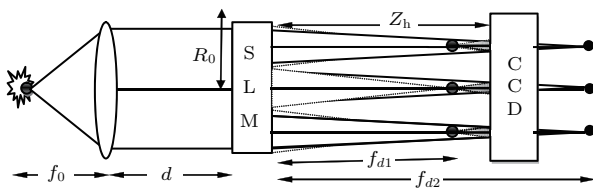


图6 SLM分区域加载模式示意图

Fig. 6. Schematic diagram of SLM zone mode.

如上述几种加载模式, 将不同相位模式复合成一张掩模, 整个SLM上加载的是一个双透镜, 只有一个光轴, CCD上记录的是一张混合了三个相移的复合全息图, 并且三个相移图叠加在一起, 很难将它们提取出来. 我们以图6为设计理念, 在SLM上加载双透镜阵列模式, 将SLM平均分成三个区

域, 分别对应加载三个相位因子, 且每个区域随机选取一半的像素加载焦距为 f_{d1} 的透镜相位, 另一半加载焦距为 f_{d2} 的透镜相位. 从图6可以看到, 这种加载模式有三个双透镜, 对应有三个光轴, 这样能更好地将通过SLM的光束聚集在CCD不同位置, 不同相移全息图并不重合, 有利于从CCD上提取不同相位的全息图. 首先对图6设计理念进行了模拟仿真, 由于SLM幅面上同时加载了三个相位模式, 一个相位对应透镜直径减小, 成像系统视场也相应减小. 对图2(c)的中间字母“zzu”进行单次曝光记录, 模拟结果如图7所示. 图7(a)是在SLM上同时加载三个双透镜阵列的相位因子的掩模, 图7(b)—(d)对应三幅相移子全息图, 并将子全

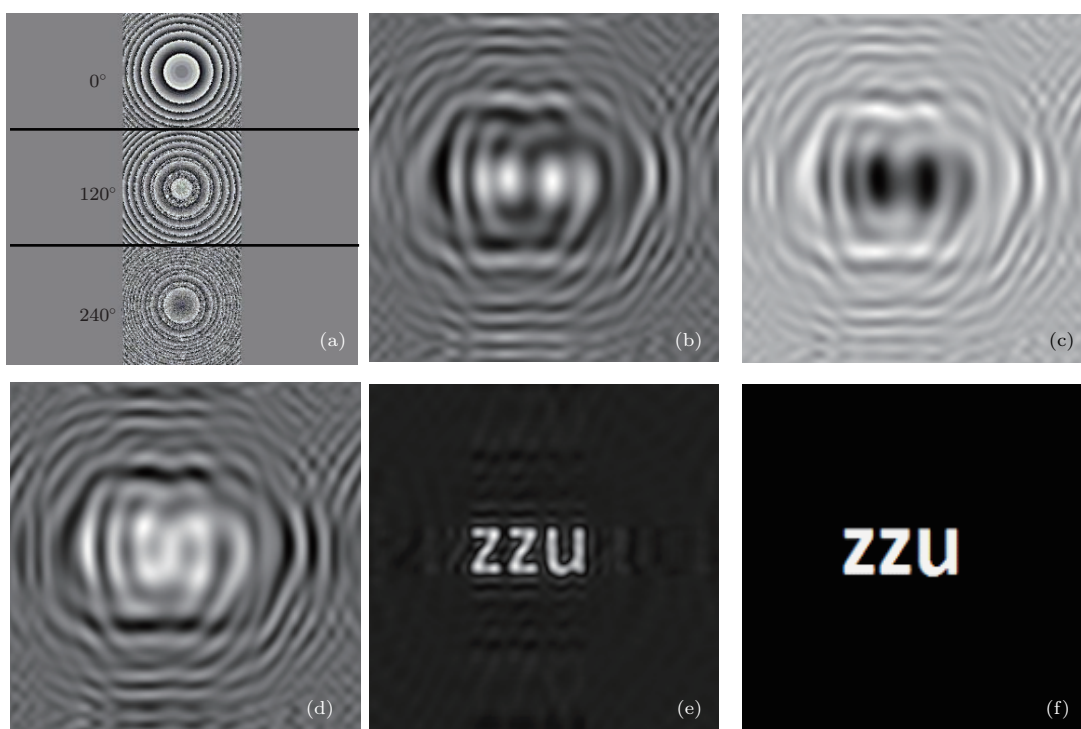


图7 (a) SLM 加载透镜阵列模式掩模图; (b) 0° 相移子全息图; (c) 120° 相移子全息图; (d) 240° 相移子全息图; (e) 再现像; (f) 原图

Fig. 7. (a) SLM zone mode, and the order of phase factors for mask is 0° , 120° , 240° ; (b) 0° sub-holograms; (c) 120° sub-holograms; (d) 240° sub-holograms; (e) the reconstructed image; (f) the original image.

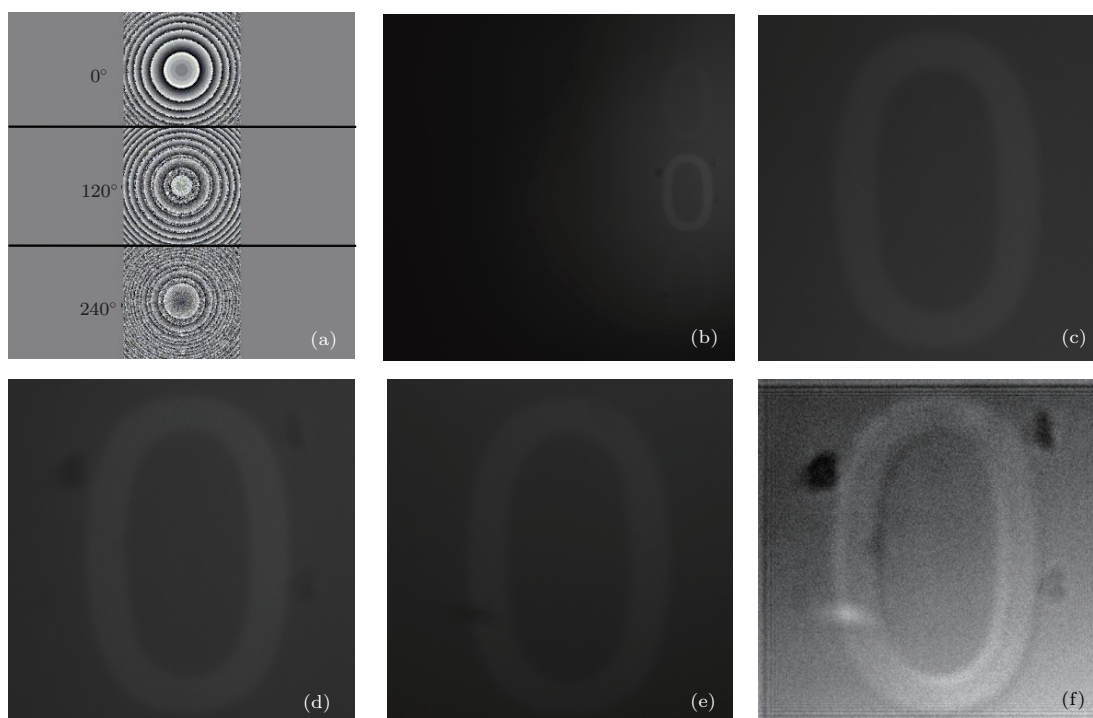


图8 (a) SLM 加载透镜阵列模式掩模图; (b) 单次曝光复合相移全息图; (c) 0° 相移全息图; (d) 120° 相移全息图; (e) 240° 相移全息图; (f) 再现像

Fig. 8. (a) SLM zone mode, the order of phase factors for mask is 0° , 120° , 240° ; (b) holograms; (c) 0° sub-holograms; (d) 120° sub-holograms; (e) 240° sub-holograms; (f) the reconstructed image.

息图进行三步相移计算,合成一幅包含有物光波的复值全息图,通过数值再现算法重建得到再现像图7(e),图7(f)为原图.由图7可以看出,在SLM上同时加载三个双透镜阵列的相位因子掩模进行全息记录,能得到较为清楚的再现物体,说明在SLM加载双透镜阵列模式能够实现FINCH记录的单次曝光.

实验中,对分辨率板USAF1951上第0组数字“0”进行实时记录.根据图8(a)所示,在SLM加载透镜阵列模式,从上到下双透镜模式对应的相位因子分别为 0° , 120° , 240° ,每个透镜区域大小为 170×170 像素单元,然后进行FINCH成像.单次曝光后,在CCD上记录的全息图如图8(b),可以清晰地看到在一张全息图上记录了三个“0”,形成了一幅复合相移全息图.通过MATLAB编程,对这三个零进行边缘提取计算,得到了三张对应的 0° , 120° , 240° 子全息图,如图8(c)—(e)所示.对这三张全息图再进行三步相移计算得到物体的全息图,利用角谱衍射法数值计算,得到再现像如图8(f),可以看到再现像清晰,说明通过在SLM上加载这种透镜阵列复合相移模式,可以实现FINCH记录的单次曝光,为非相干数字全息术的实时成像提供有力保障.

4 结 论

FINCH技术中最引人注目的是通过SLM来实现分波功能,一经提出便展现了其独特的优势,记录系统不需任何扫描装置和移动部件,快速拍摄 N 张具备不同相移量的全息图就可在计算机中利用算法完成对样品三维信息的重构,但由于FINCH属于同轴全息,至少需要记录两次去除孪生项及直流项,不能用于动态物体的观测与记录.我们充分利用SLM可以通过计算机控制,分区域进行编码,在实验中使用了两种掩模形式,第一种掩模是在从上到下依次提取 0° , 120° , 240° 相位合成了一幅复合相移掩模,有一个光轴,第二种同时含有 0° , 120° , 240° 三个相位的双透镜阵列模式,三个相位分别对应一个光轴,这两种掩模都可以实现FINCH的单次曝光记录.相比较之下第一种掩模视场比较大,可以对整个分辨率板进行成像,但是子相移图混合在一起,无法提取出来,再现像质量较差;第二种掩模可以提取三个子全息图,再现

像质量较好,但成像视场比较小,适合于对微小生物和物体的实时成像.这种数字全息记录兼具了FINCH技术的优点,操作简单,又能充分利用SLM可分区域编码的特性,一次拍摄含有三个相移因子的全息图,实现了单次曝光,提高了成像效率.为相位物体显微的观测或者粒子束的检测以及微小形变测量等应用领域提供了新的测量方式,因此可望用于动态物体的观测与再现.

参考文献

- [1] Wan Y H, Man T L, Wang D Y 2014 *Opt. Express* **22** 8565
- [2] Lei X, Peng X Y, Guo Z X, Miao J M, Asundi A 2005 *Opt. Express* **13** 2444
- [3] Pedrini G, Li H, Faridian A, Osten W 2012 *Opt. Lett.* **37** 713
- [4] Osten W, Faridian A, Gao P, Körner K, Naik D, Pedrini G, Singh A K, Takeda M, Wilke M 2014 *Appl. Opt.* **53** 44
- [5] Rosen J, Brooker G 2007 *Opt. Lett.* **32** 912
- [6] Rosen J, Brooker G 2007 *Opt. Express* **15** 2244
- [7] Rosen J, Brooker G 2008 *Nat. Photon.* **2** 190
- [8] Katz B, Rosen J, Kelner R 2012 *Opt. Express* **20** 9109
- [9] Liu Y C, Lu X X, Tao T, Zhang D S, Deng J, Wang H K, Zhang Z, Zhong L Y 2013 *Asia Communications and Photon Conference* Guangzhou, China, November 7–10, 2013 p14
- [10] Liu Y C, Fan J P, Zeng F C, Lü X X, Zhong L Y 2013 *Chin. J. Lasers* **40** 239 (in Chinese) [刘英臣, 范金坪, 曾凡创, 吕晓旭, 钟丽云 2013 中国激光 **40** 239]
- [11] Wan Y H, Man T L, Tao S Q 2014 *Chin. J. Lasers* **41** 43 (in Chinese) [王玉红, 满天龙, 陶世荃 2014 中国激光 **41** 43]
- [12] Bouchal P, Bouchal Z 2013 *JEOS: RP* **8** 13011
- [13] Katz B, Rosen J 2011 *Opt. Express* **19** 4924
- [14] Kashter Y, Rosen J 2014 *Opt. Express* **22** 20551
- [15] Weng J W, Qin Y, Yang C P, Li H 2015 *Laser Optoelect. Prog.* **52** 116 (in Chinese) [翁嘉文, 秦怡, 杨初平, 李海 2015 激光与光电子学进展 **52** 116]
- [16] Zhu Z Q, Wang X L, Sun M, Li L J, Feng S T, Nie S P 2009 *J. Optoelect. Laser* **20** 1681 (in Chinese) [朱竹青, 王晓雷, 孙敏, 李璐杰, 冯少彤, 聂守平 2009 光电子 **20** 1681]
- [17] Shi X, Zhu W F, Yuan B, Du Y L, Gong Q X, Guo M T, Liang E J, Ma F Y 2015 *Chin. J. Lasers* **42** 265 (in Chinese) [石侠, 朱五凤, 袁斌, 杜艳丽, 弓巧侠, 郭茂田, 梁二军, 马凤英 2015 中国激光 **42** 265]
- [18] Yamaguchi I, Zhang T 1997 *Opt. Lett.* **22** 1268
- [19] Li J C, Song Q X, Pascal P, Gui J B, Lou Y L 2014 *Chin. J. Lasers* **41** 81 (in Chinese) [李俊昌, 宋庆和, Picart Pascal, 桂进斌, 楼宇丽 2014 中国激光 **41** 81]

Single-shot incoherent digital holography based on spatial light modulator*

Bai Yun-He Zang Rui-Huan Wang Pan Rong Teng-Da Ma Feng-Ying Du Yan-Li
Duan Zhi-Yong Gong Qiao-Xia[†]

(School of Physical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

(Received 26 September 2017; revised manuscript received 28 November 2017)

Abstract

Fresnel incoherent correlation holography (FINCH) is a relatively innovative technology, which can achieve incoherent holograms by using the correlation between the object information and a Fresnel zone plate. In this method, the optical wave front scattered from an object propagates and is incident on a spatial light modulator which a phase mask is mounted on, and then the optical beam is split and phase shifted. The biggest advantage of the FINCH is that it can be matched with any standard optical imaging technology, which can realize microscopic imaging, telescopic imaging, spectroscopic imaging, etc. based on incoherent digital holography, and has important application prospect in remote sensing, astronomy, microscopy, and material analysis. In this paper, based on phase modulation characteristic of spatial light modulator, two types of masks are used. The first mask has an optical axis. And the results show that when the distribution intervals of the three phases on the spatial light modulator (SLM) are larger, the reconstruction image is clearer. On this basis, a new method of mode mounting on the SLM is put forward. The second mask has dual-lens array mode with three phases of 0° , 120° , and 240° , and the three phases respectively correspond to their corresponding optical axis, which means that the mask has three optical axes. Both of the two masks can achieve the single-shot of FINCH. By comparing the two mask forms, we find that the field-of-view of the first mask is larger, which can image the entire resolution board; however, because the sub-phase shift holograms are mixed together and cannot be extracted, the quality of the reconstructed image is worse. The second one can extract three sub-holograms, and the reconstructed image has better quality; but because of smaller imaging field of view, it is suitable for the real-time imaging of microorganisms and objects. Experiments show that a compound digital hologram including three phase-shifting elements is recorded in charge-coupled device in this way. Three sub-holograms with different phase shift angles are extracted from the compound hologram, and there is no overlapping among the three phase shift holograms. Therefore, the three-phase-shifting technique is usually employed. The sample is reconstructed by numerical reconstruction algorithm. The proposed method may be useful in dynamic process real-time measurement and three-dimensional analysis of the object, and thus providing a new way to promote the development of incoherent digital holography.

Keywords: holography, incoherent digital holography, single-exposure, spatial light modulator

PACS: 42.40.-I, 42.40.Eq, 42.40.Ht, 42.40.Jv

DOI: 10.7498/aps.67.20172127

* Project supported by the Natural Science Foundation of Henan Province of China (Grant No. 16A140035) and the 2018 Group of Science and technology Innovation in Universities of Henan Province, China (Grant No. 18IRTSTHN016).

[†] Corresponding author. E-mail: gqx1205@zzu.edu.cn