

白光菲涅耳非相干数字全息的记录、再现及实现

刘英臣¹ 范金坪² 曾凡创¹ 吕晓旭¹ 钟丽云¹

(¹ 华南师范大学广东省微纳光子功能材料与器件重点实验室, 广东 广州 510006)
² 深圳信息职业技术学院, 广东 深圳 518172)

摘要 在分析白光菲涅耳非相干数字全息记录和再现的基础上,详细讨论了再现像分辨率与记录参数的关系。分别对空间光调制器(SLM)上加载一个平面波和一个球面波相位,以及加载两个球面波相位情况下,实现白光菲涅耳非相干数字全息记录和再现进行了模拟和实验研究,定量分析了成像质量与记录参数的关系。研究表明,基于 SLM 的白光菲涅耳非相干数字全息能够以单通道、无运动的方式实现三维物体的快速记录和再现。理论上,无论 SLM 上加载一个平面波和一个球面波相位,还是加载两个球面波相位的白光菲涅耳非相干数字全息系统,其再现像分辨率都可以达到相同的最大分辨率。但在实验研究中,由于对光源的带宽和 CCD 尺寸的要求不同,加载两个球面波相位时对记录条件的要求比加载一个平面波和一个球面波相位的情况大大降低。在相同的实验条件下,前者再现像的分辨率远远大于后者。

关键词 全息; 非相干数字全息; 空间光调制器; 再现像分辨率

中图分类号 O438.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.1009002

Recording, Reconstruction and Realization of White-Light Fresnel Incoherent Digital Holography

Liu Yingchen¹ Fan Jinping² Zeng Fanchuang¹ Lü Xiaoxu¹ Zhong Liyun¹

¹ Key Laboratory of Micro-Nano Photonics Functional Materials and Devices in Guangdong Province, South China Normal University, Guangzhou, Guangdong 510006, China
² Shenzhen Institute of Information Technology, Shenzhen, Guangdong 518172, China

Abstract Based on the analysis of the fundamental principle of the recording and reconstruction of white-light fresnel incoherent digital holography, the relationship between the reconstructed image resolution and recording parameters is discussed in detail. With two different types of phases loaded on the spatial light modulator (SLM), numerical simulation and experimental research of white-light fresnel incoherent digital holography are implemented respectively to analyse the relationship between image quality and recording parameters quantitatively. Results show that white-light fresnel incoherent digital holography based on SLM can realize the recording and reconstruction of three-dimensional object rapidly in a single channel and motionless way. Theoretically, a high quality reconstructed image with the same maximum resolution can be obtained, whichever phase loaded on SLM it is, a plane wave and a spherical wave or two spherical waves. However, due to the different requirements of the bandwidth of the light source and CCD size in the experimental study, the recording condition of loaded phase of two spherical waves is greatly reduced than that of loaded phase of a plane wave and a spherical wave. Under the same experimental conditions, the former reconstructed image resolution is much higher than the latter.

Key words holography; incoherent digital holography; spatial light modulator; reconstructed image resolution

OCIS codes 090.1995; 050.1940; 050.5080

收稿日期: 2013-04-09; 收到修改稿日期: 2013-05-30

基金项目: 国家自然科学基金(61078064, 61177005, 61275015)

作者简介: 刘英臣(1987—), 女, 硕士研究生, 主要从事非相干全息方面的研究。E-mail: lyc123119@163.com

导师简介: 钟丽云(1968—), 女, 博士, 教授, 主要从事光学微纳成像和生物单分子探测等方面的研究。

E-mail: zhongly@scnu.edu.cn(通信联系人)

1 引 言

数字全息术能够同时获取待测物体的振幅和相位信息,在定量相位检测及三维形貌测量等领域具有广泛的应用^[1-3]。然而,传统数字全息对光源的高度相干性及系统稳定性的要求限制了其实际应用。近年来,一些非相干全息成像方法及应用的文献不断见诸报道^[4-7],这些方法均采用非相干光作为光源,在一定程度上拓展了全息术的应用领域。最早由 Mertz 等^[4]提出了波带片编码全息成像技术,其实现过程与相干全息一样,包括全息图的记录和成像目标的重建。然而,在该方法中全息图的记录基于几何光学原理,任何衍射现象的发生都将导致记录面上全息图的模糊,带来一定失真。计算全息术(CGHI)^[5]不需要物体实际存在,而是把物波的数学描述输入计算机,经处理后绘制出全息图,因此,计算全息可以避免对光学系统和光源相干性的严格要求,但计算量非常大。而多视角投影全息(MVP)^[6]通过移动 CCD 相机获取大量不同角度的全息图合成一幅数字全息图,但主要缺点是耗时。光学扫描全息术(OSH)^[7]中由于物体与非涅耳波带片之间的相对移动,速度也相对较慢。

近年来,Rosen 等^[8]提出了一种新的非相干全息成像方法:菲涅耳非相干相关全息术(FINCH),并将该方法应用于显微术中^[9-10],在提高再现像的分辨率方面取得了很好的效果^[11]。Lai 等^[12-13]也分别对提高菲涅耳非相干相关全息术的信噪比及边缘对比度进行了分析。在分析白光菲涅耳非相干数字全息记录和再现原理的基础上,详细讨论了再现像分辨率与记录参数的关系,并对在空间光调制器(SLM)上加载一个平面波和一个球面波,以及加载两个球面波的白光菲涅耳非相干数字全息记录和再现进行相应的模拟和实验研究,定量分析和讨论了成像质量与记录参数的关系,其结果将为高质量白光数字全息的记录和再现图提供参考。

2 菲涅耳非相干数字全息图的记录和再现

图 1 为基于 SLM 的菲涅耳非相干相关数字全

息的记录和再现示意图。为讨论方便,首先以二维物体作为待测对象,对 SLM 上加载一个平面波与一个球面波的情况进行分析。假定待测物体位于透镜 L 的焦平面,从物体上反射或透射的白光经过带通滤波片 F、透镜 L 和 SLM 后,被 CCD 记录下来。其中,SLM 作为光束分离器,将物体上每一点所发出的入射光分为两束半径不同的球面光波,这两束光波可看作是物光和参考光^[14],在 CCD 记录面干涉形成子全息图。物光波对所有子全息图的积分便形成整个物体的一幅菲涅耳全息图。相关是描述两个函数之间相似性的一个度量,对于有两个自变量(自变参量为实数),且在无限空间内均有定义的复变函数 $f(x,y)$ 与 $h(x,y)$,其相关的定义为

$$f(x,y) \diamond h(x,y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f^*(\alpha-x, \beta-y) h(\alpha, \beta) d\alpha d\beta, \quad (1)$$

式中 $f^*(x,y)$ 表示 $f(x,y)$ 的共轭函数。可以看出:相关的定义与卷积相似,积分是对参变量进行的,所得到的积分结果是参变量的函数^[15]。在讨论的菲涅耳非相干相关数字全息术中,物体的全息图为物光波对点光源全息图的积分,而点光源的全息图具有菲涅耳波带片的形式,即该全息图体现了物体与菲涅耳波带片之间的相关性。因此,该非相干光源全息成像方法获得的全息图称为菲涅耳非相干相关全息图。

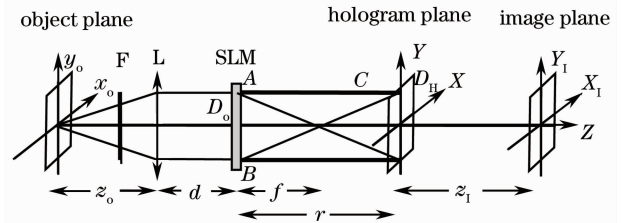


图 1 菲涅耳非相干相关数字全息记录和再现示意图
Fig. 1 Schematic for recording and reconstructing of a Fresnel incoherent relevant digital hologram

假设物体是物平面上的任意无穷小点 $p(x_0, y_0, z_0)$, z_0 是物平面与透镜 L 之间的距离, f_0 为透镜 L 的焦距, d 和 r 分别是 SLM 到透镜 L 和 CCD 记录面的距离,经过透镜 L 和 SLM 的作用后,光场在 CCD 记录面的复振幅为

$$u_p(x,y) = \frac{a_0}{z_0} \exp\left(j \frac{2\pi}{\lambda} z_0\right) \exp\left[\frac{j\pi}{\lambda} \cdot \frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{z_0}\right] \cdot \exp\left(-\frac{j\pi}{\lambda} \cdot \frac{x^2 + y^2}{f_0}\right) \otimes \exp\left(\frac{j\pi}{\lambda} \cdot \frac{x^2 + y^2}{d}\right) \cdot F(x,y) \otimes \exp\left(\frac{j\pi}{\lambda} \cdot \frac{x^2 + y^2}{r}\right). \quad (2)$$

式中“ \otimes ”表示二维卷积, $F(x, y)$ 是 SLM 的调制作用函数, 光束分离功能是通过将其所有像素随机分成 2 等份, 然后同时加载两个不同半径的球面波相位因子来实现的。其中一球面波的半径为 f , 另一球面波半径为无限大, 即一个球面波和一个平面波的叠加。此时 SLM 可视为一个透镜和一个反射镜的组合, 其作用函数可以表示为

$$F(x, y) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \exp\left[-\frac{j\pi}{\lambda f}(x^2 + y^2) + j\theta\right], \quad (3)$$

式中常数项和二次相位项分别代表反射镜和透镜的作用函数, f 是球面波半径, 即 SLM 上透镜的焦距, θ 的引入是为了消除再现像中的零级像和孪生像。将(3)式代入(2)式展开并计算可得物体上任意点在记录面的光场分布为

$$u_p(x, y) = -\frac{C_1 \lambda^2}{2k_1 k_2} \exp\left[\frac{j\pi}{\lambda} \left(\frac{x^2 + y^2}{r} - \frac{x_o^2 + y_o^2}{k_1 z_o^2}\right)\right] \cdot \left\{ \exp\left\{-\frac{j\pi}{\lambda} \left\{\frac{[x_o/(k_1 z_o d) + (x/r)]^2}{k_2} + \frac{[y_o/(k_1 z_o d) + (y/r)]^2}{k_2}\right\}\right\} + \exp\left\{-\frac{j\pi}{\lambda} \left\{\frac{[x_o/(k_1 z_o d) + (x/r)]^2}{k_2 - 1/f} + \frac{[y_o/(k_1 z_o d) + (y/r)]^2}{k_2 - 1/f}\right\} + j\theta\right\} \right\}, \quad (4)$$

式中 $C_1 = \frac{a_o}{z_o} \exp\left(j \frac{2\pi}{\lambda} z_o\right) \exp\left(\frac{j\pi}{\lambda} \cdot \frac{x_o^2 + y_o^2}{z_o}\right)$, $k_1 = \frac{1}{z_o} - \frac{1}{f_o} + \frac{1}{d}$, $k_2 = \frac{1}{d} + \frac{1}{r} - \frac{1}{k_1 d^2}$ 。则无限小点物体 $p(x_o, y_o, z_o)$ 在 CCD 面的记录光强为

$$I_p(x, y) = u_p \cdot u_p^* = A \left\{ B + \exp\left\{\frac{j\pi}{\lambda z_1} [(x + M_T x_o)^2 + (y + M_T y_o)^2] + j\theta\right\} + \exp\left\{\frac{-j\pi}{\lambda z_1} [(x + M_T x_o)^2 + (y + M_T y_o)^2] - j\theta\right\} \right\}, \quad (5)$$

式中 A, B 为常量, $z_1 = \left[\left(\frac{1}{k_2} - \frac{1}{k_2 - 1/f}\right) \frac{1}{r}\right]^{-1}$ 为再现距离, $M_T = \frac{r}{k_1 z_o d}$ 是横向放大率。(5)式也是该非相干成像系统的点扩展函数。

对于由非相干光照射的三维物体 $g(x_o, y_o, z_o)$, 则其在 CCD 面的全息图强度分布是所有物点记录光强的积分:

$$I(x, y) = A \left\{ C + \iiint g(x_o, y_o, z_o) \exp\left\{\frac{j\pi}{\lambda z_1} [(x + M_T x_o)^2 + (y + M_T y_o)^2] + j\theta\right\} dx_o dy_o dz_o + \iiint g(x_o, y_o, z_o) \exp\left\{-\frac{j\pi}{\lambda z_1} [(x + M_T x_o)^2 + (y + M_T y_o)^2] - j\theta\right\} dx_o dy_o dz_o \right\}, \quad (6)$$

式中 C 为常量。(6)式表明, CCD 记录的全息图除一个常数项外, 还有两个共轭项, 即物体与二次相位函数之间的相关项。作为单通道的非相干数字全息, 记录光路与同轴数字全息的光路类似, 再现存在孪生像和零级像与原始像重叠的问题。通过在全息记录中引入三步或四步相移算法, 这个问题能得到有效的解决。假设非相干数字全息记录中引入的三个相移常量分别为 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$, 相应的全息图分别为 I_1, I_2, I_3 , 根据三步相移叠加算法^[8], 合成的全息图可以表示为

$$I_F(x, y) = I_1[\exp(-j\theta_3) - \exp(-j\theta_2)] + I_2[\exp(-j\theta_1) - \exp(-j\theta_3)] + I_3[\exp(-j\theta_2) - \exp(-j\theta_1)] = A[C + M \exp(j\theta_1) + N \exp(-j\theta_1)][\exp(-j\theta_3) - \exp(-j\theta_2)] + A[C + M \exp(j\theta_2) + N \exp(-j\theta_2)][\exp(-j\theta_1) - \exp(-j\theta_3)] + A[C + M \exp(j\theta_3) + N \exp(-j\theta_3)][\exp(-j\theta_2) - \exp(-j\theta_1)] = AM\{\exp[j(\theta_3 - \theta_2)] + \exp[j(\theta_2 - \theta_1)] + \exp[j(\theta_1 - \theta_3)] - \exp[j(\theta_1 - \theta_2)] - \exp[j(\theta_2 - \theta_3)] - \exp[j(\theta_3 - \theta_1)]\}, \quad (7)$$

式中

$$M = \iiint g(x_o, y_o, z_o) \exp\left\{\frac{j\pi}{\lambda z_1} [(x + M_T x_o)^2 + (y + M_T y_o)^2]\right\} dx_o dy_o dz_o, \quad (8)$$

$$N = \iiint g(x_o, y_o, z_o) \exp\left\{-\frac{j\pi}{\lambda z_1}[(x + M_T x_o)^2 + (y + M_T y_o)^2]\right\} dx_o dy_o dz_o. \quad (9)$$

由(6)、(7)式可知,(6)式中与再现光场中的零级像和孪生像对应的部分在(7)式中已被完全消除,其中 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 可以取 $0 \sim 2\pi$ 内的任意值。

对(7)式所表示的非涅耳非相干相关全息图进行数字再现时,其再现光场的复振幅可以表示为

$$g(x, y, z) = I_F(x, y) \otimes \exp\left[\frac{j\pi}{\lambda} \frac{x^2 + y^2}{z_1}\right]. \quad (10)$$

根据瑞利分辨判据^[16],系统的像分辨率由艾里斑图样的直径 $1.22 (\lambda/NA_{out})$ 决定。对于非涅耳非相干相关全息成像系统,考虑到像经过 M_T 倍放大作用,为分析讨论方便,令

$$\sigma = 1.22 \frac{\lambda}{NA_{out} M_T}. \quad (11)$$

式中 $NA_{out} = \sin u'$ 为相对像方的数值孔径, u' 表示从像平面看时出射光瞳 SLM 张的半角。由几何关系及考虑物体位于透镜焦平面时有 $z_1 = |r - f|$, $M_T = r/z_o$, 则 $NA_{out} = \sin u' = D_o/f = D_H/z_1$, D_o 和 D_H 分别为 SLM 和 CCD 记录面上全息图的半径, 将上述条件代入(11)式可得

$$\sigma = \frac{1.22\lambda z_o}{D_o} \cdot \frac{f}{r} = \frac{1.22\lambda}{NA_{in}} \cdot \frac{f}{r}, \quad (12)$$

式中 $NA_{in} = \sin u = D_o/z_o$ 指相对物方的数值孔径, u 表示从物平面看时入射光瞳即透镜 L 张的半角, 透镜尺寸较大, 其对光束孔径的限制实际取决于有效光阑, 即 SLM 的半径。由(12)式可知, 系统分辨率随 r/f 的增大而增加; 当 $r > 2f$ 时, CCD 记录面上全息图的半径不再增大。也就是说, 当 r 取最大值 $r = 2f$ 时, 系统可达到最大分辨率, 即 $\sigma = 0.61\lambda z_o/D_o$ 。

对于光源为非单色的成像系统来说, 记录系统的最大光程差小于光源相干长度是获得高质量再现像的一个重要保证, 即 $\Delta l_{max} \leq \lambda^2/\Delta\lambda$ 。如图 1 所示, 系统的最大光程差为

$$\Delta l_{max} = |\overline{BC} - \overline{AC}| = \left| \sqrt{r^2 + (2D_o)^2} - r \right| \approx \frac{2D_o^2}{r}. \quad (13)$$

(13)式表明, 通过增加 CCD 记录面与 SLM 之间的距离 r , 减小系统的最大光程差, 可提高白光全息再

现像的质量。

对于在 SLM 上加载两个不同半径 f_1, f_2 球面波的情形, 其再现距离为 $z_1 = \left| \frac{(r - f_1)(r - f_2)}{f_1 - f_2} \right|$, 全息图的半径为 $D_H = \frac{|r - f_1|}{f_1} D_o = \frac{|f_2 - r|}{f_2} D_o$, 则其在物平面的分辨率为

$$\sigma = 1.22 \frac{\lambda z_1}{D_H M_T} = \frac{0.61\lambda z_o}{D_o}. \quad (14)$$

相应的最大光程差也可表示为

$$\Delta l_{max} \approx \frac{D_o^2(f_2 - f_1)}{f_1 f_2}. \quad (15)$$

对比(12)、(14)式以及(13)、(15)式可以看出: 为获得系统的最大分辨率, 对于在 SLM 上加载一个平面波和一个球面波相位的情况, 需要满足 $r = 2f$ 。此时, 系统对记录全息图的 CCD 尺寸要求增大, 且记录面要远离像平面, 这样就使得记录全息图的信噪比大大降低, 从而再现像质量也大大降低。但是, 对于 SLM 上加载两个球面波相位因子的情况, 由于记录面与像平面的距离较近, 即两个球面波半径差小, 这样系统的最大光程差大大降低, 从而使再现像的质量得到很大的提高。

3 模拟和实验

在以下非涅耳非相干数字全息的模拟研究中, 以四幅黑底白色字母“s”、“c”、“n”、“u”($N_x \times N_y = 256 \times 256, L_x = L_y = 5.12 \text{ mm}$) 作为待测物体, 非相干光源的波长分布设置在 $532 \sim 572 \text{ nm}$ 范围内, $f_o = 250 \text{ mm}, d = 132 \text{ mm}, f = 260 \text{ mm}, r = 520 \text{ mm}$, 四个字母分别位于 $z_o = 250, 265, 280, 295 \text{ mm}$ 。SLM 和 CCD 的参数均为: $N_x \times N_y = 256 \times 256, \Delta x = \Delta y = 20 \mu\text{m}$, 图 2(a)、(b) 分别是由(5)式模拟得到的合成全息图的强度和相位分布, 图 2(c)、(d)、(e)、(f) 分别是“s”、“c”、“n”、“u”在最佳再现焦平面的再现像。结果表明: 通过在 SLM 上进行相位的加载, 白光非涅耳非相干数字全息术可以单通道、无运动的方式实现三维物体的快速记录和再现。

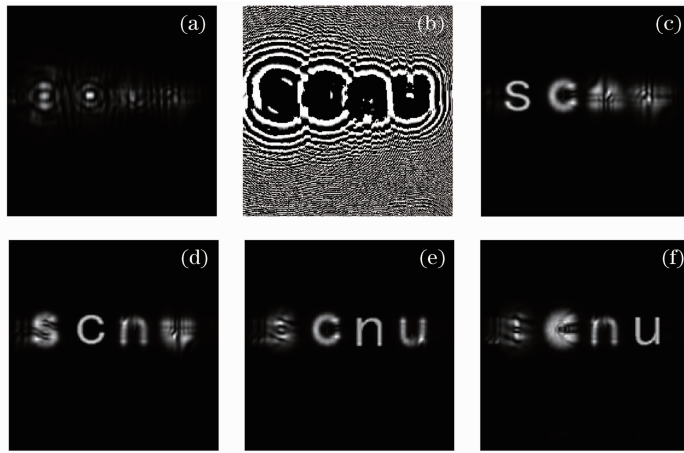


图2 白光菲涅耳非相干数字全息模拟计算结果。(a)模拟记录全息图强度;(b)模拟记录全息图相位;(c)在“s”再现焦平面的再现像;(d)在“c”再现焦平面的再现像;(e)在“n”再现焦平面的再现像;(f)在“u”再现焦平面的再现像

Fig.2 Simulation results of white-light Fresnel incoherent relevant digital holography. (a) Hologram intensity through simulating; (b) hologram phase through simulating; reconstructed image at the focal plane of (c) “s”, (d) “c”, (e) “n” and (f) “u”

在实验研究中,SLM是反射式的,像素大小为 $20\ \mu\text{m}\times 20\ \mu\text{m}$,像素数为 $1280\ \text{pixel}\times 768\ \text{pixel}$,实际所用像素数为 $750\ \text{pixel}\times 750\ \text{pixel}$ 。图3(a)~(c)为SLM上加载一个平面波和一个球面波相位因子的3幅相位分布图($256\ \text{pixel}\times 256\ \text{pixel}$),其对应的相移量分别为 $0, 2\pi/3, 4\pi/3$ 。用于实验记录全息图的CCD像素数为 $640\ \text{pixel}\times 512\ \text{pixel}$,像素大小为 $5.2\ \mu\text{m}\times 5.2\ \mu\text{m}$ 。高压汞灯(功率 $100\ \text{W}$)作为光源,记录物体为标准鉴别率板USAF1951上第0组第4单元的光栅($1.414\ \text{lp/mm}$),带通滤波器的带宽为 $40\ \text{nm}$,中心波长为 $600\ \text{nm}$ 。实验记录中,透镜L焦距 $f_0=190\ \text{mm}$,鉴别率板置于透镜L的前焦面上,SLM与准直透镜间的距离为 $d=132\ \text{mm}$,加载到SLM上的球面波半径为 $f=520\ \text{mm}$ 。考虑到CCD

尺寸小于SLM,为提高SLM的像素利用率,选择CCD的记录距离为 $r=260\ \text{mm}$ 。图3(d)和3(e)分别给出CCD记录的一幅白光全息图和其再现像。可以看出:实验结果与理论分析是基本吻合的,但系统的实际分辨率约为 $\sigma_1=354\ \mu\text{m}$,小于理论值 $\sigma=103\ \mu\text{m}$ 。主要原因是:在实际物体的记录中,一方面,由于CCD尺寸小于SLM,物光波的高频信息部分丢失;另一方面,为提高SLM的像素利用率和满足相干条件,CCD记录面与物体像平面的距离一般设置较远,这样导致记录全息图信噪比大大降低,从而使实验所得再现像的分辨率低于理论值。另外,在实验过程中,由于空气扰动和衍射光场的调制等原因,使记录的非相干全息图存在噪声,对实验再现像的分辨率也有一定影响。

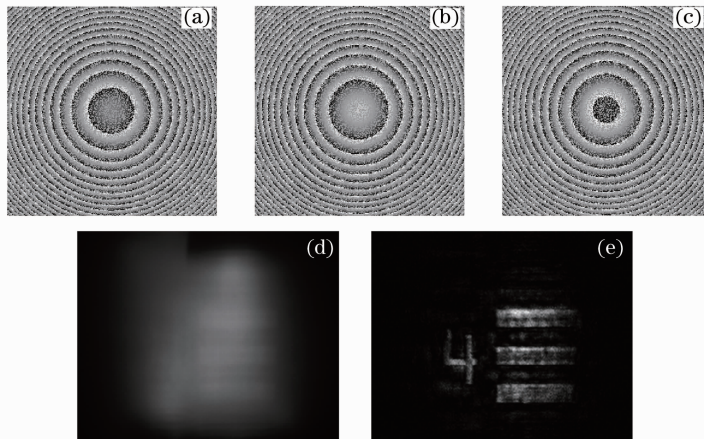


图3 SLM加载一个平面波和一个球面波的相移相位分布。(a) 0 ; (b) $2\pi/3$; (c) $4\pi/3$; (d)白光菲涅耳非相干数字全息图;(e)再现像

Fig.3 Phase distribution with a plane wave and a spherical wave on SLM. (a) 0 ; (b) $2\pi/3$; (c) $4\pi/3$; (d) white-light fresnel incoherent relevant digital holography; (e) reconstructed image

针对上述问题,对 SLM 上加载两个球面波相位因子的情况进行进一步的实验研究。图 4(a)~(c)分别为相移量为 $0, 2\pi/3, 4\pi/3$ 的相位分布($256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$),其中两球面波的半径分别为 $f_1 = 400 \text{ mm}$, $f_2 = 450 \text{ mm}$,物体为标准鉴别率板 USAF1951 上第 2 组第 2、3 单元的光栅($4.490 \text{ lp/mm}, 5.040 \text{ lp/mm}$)。图 4(d)和 4(e)分别

为 CCD 记录的白光菲涅耳非相干数字全息图和其再现像。对比图 3 的结果可以看出,由于记录不受 CCD 尺寸的限制,SLM 上加载两个球面波的白光菲涅耳非相干数字全息再现像的分辨率达到 $\sigma_2 = 99.2 \mu\text{m}$,远高于 SLM 上加载一个平面波和一个球面波相位因子的情况。

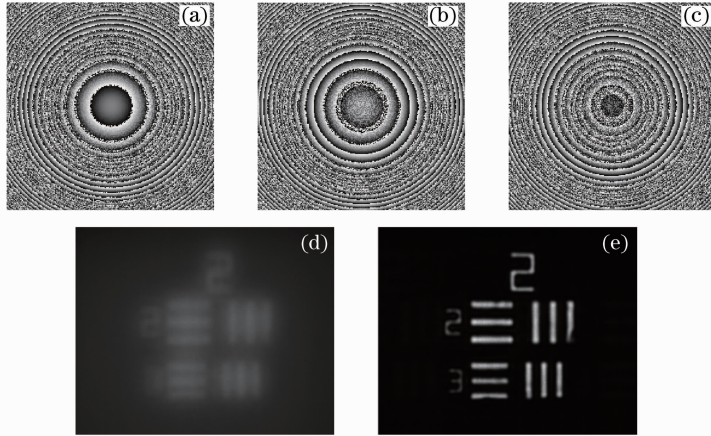


图 4 SLM 加载两个球面波的相移相位分布。(a) 0 ; (b) $2\pi/3$; (c) $4\pi/3$; (d) 白光菲涅耳非相干数字全息图; (e) 再现像

Fig. 4 Phase distribution with two spherical waves on SLM. (a) 0 ; (b) $2\pi/3$; (c) $4\pi/3$; (d) white-light fresnel incoherent relevant digital holography; (e) reconstructed image

4 结 论

用菲涅耳衍射理论,分析了白光菲涅耳非相干数字全息记录和再现的原理,详细讨论了再现像分辨率与记录参数的关系。在此基础上,分别对 SLM 上加载一个平面波和一个球面波相位因子,以及 SLM 上加载两个球面波相位因子两种情况,实现白光菲涅耳非相干数字全息记录和再现进行了数值模拟和实验研究,定量分析了成像质量与记录参数的关系。研究表明,基于 SLM 的白光菲涅耳非相干数字全息能够以单通道、无运动的方式实现三维物体的快速记录和再现。理论上,无论 SLM 上加载一个平面波和一个球面波相位因子,还是加载两个球面波相位因子的白光菲涅耳非相干数字全息系统,其再现像的分辨率都可以达到相同的最大分辨率 $\sigma = 0.61\lambda z_0/D_0$ 。但在实际的实验研究中,由于对光源带宽和 CCD 尺寸大小的要求不同,SLM 上加载两个球面波相位因子的白光菲涅耳非相干数字全息再现像的分辨率比加载一个平面波和一个球面波相位因子的情况大大提高。上述研究结果将为高质量白光数字全息的记录和再现图提供重要的参考。

参 考 文 献

- 1 Wang Yunxin, Wang Dayong, Zhao Jie, *et al.*. 3D profile measurement for micro-optical component by using digital holographic microscopy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(4): 0412003.
王云新,王大勇,赵洁,等. 基于数字全息显微成像的微光学元件三维面形检测[J]. *光学学报*, 2011, 31(4): 0412003.
- 2 Wang Huaying, Guo Zhongjia, Zhang Zhihui, *et al.*. Image-plane digital holography for quantitative imaging of cells of Chinese medical decoction pieces[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(2): 0209002.
王华英,郭中甲,张志会,等. 基于像面数字全息术的中药饮片细胞定量成像技术研究[J]. *中国激光*, 2012, 39(2): 0209002.
- 3 Ma Lihong, Wang Hui, Jin Hongzhen, *et al.*. Experimental study on quantitative phase imaging by digital holographic microscopy[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(3): 0309002.
马利红,王辉,金洪震,等. 数字全息显微定量相位成像的实验研究[J]. *中国激光*, 2012, 39(3): 0309002.
- 4 Mertz L, Young N O. Fresnel transformations of images (fresnel coding and decoding of images)[C]. *Proceeding of the Conference held in London on Optical Instruments and Techniques*, 1961, 305-310.
- 5 Youzhi Li, David Abookasis, Joseph Rosen. Computer-generated holograms of three-dimensional realistic objects recorded without wave interference[J]. *Appl Opt*, 2001, 40(17): 2864-2870.
- 6 N T Shaked, J Rosen. Multiple-viewpoint projection holograms synthesized by spatially incoherent correlation with broadband functions[J]. *J Opt Soc Am A*, 2008, 25(8): 2129-2138.
- 7 G Indebetouw, P Klysubun, T Kim, *et al.*. Imaging properties of scanning holographic microscopy[J]. *J Opt Soc Am A*, 2000, 17(3): 380-390.
- 8 Joseph Rosen, Gary Brooker. Digital spatially incoherent Fresnel

- holography[J]. Opt Lett, 2007, 32(8): 912–914.
- 9 Gary Brooker, Nisan Siegel, Victor Wang, *et al.*. Optimal resolution in Fresnel incoherent correlation holographic fluorescence microscopy [J]. Opt Express, 2011, 19(6): 5047–5062.
- 10 Joseph Rosen, Nisan Siegel, Gary Brooker. Theoretical and experimental demonstration of resolution beyond the Rayleigh limit by FINCH fluorescence microscopic imaging [J]. Opt Express, 2011, 19(27): 26249–26268.
- 11 B Katz, J Rosen, R Kelner, *et al.*. Enhanced resolution and throughput of Fresnel incoherent correlation holography (FINCH) using dual diffractive lenses on a spatial light modulator (SLM)[J]. Opt Express, 2012, 20(8): 9109–9121.
- 12 Xiaomin Lai, Yuan Zhao, Shaoqun Zeng, *et al.*. Fluorescence holography with improved signal-to-noise ratio by near image plane recording[J]. Opt Lett, 2012, 37(13): 2445–2447.
- 13 Petr Bouchal, Zdenek Bouchal. Selective edge enhancement in three-dimensional vortex imaging with incoherent light[J]. Opt Lett, 2012, 37(14): 2949–2951.
- 14 Petr Bouchal, Josef Kapitan, Zdenek Bouchal, *et al.*. Point spread function and two-point resolution in Fresnel incoherent correlation holography [J]. Opt Express, 2011, 19(16): 15603–15620.
- 15 Liang Ruisheng, Lü Xiaoxu. Information Optics[M]. Beijing: Electronics Industry Press, 2008. 15–17, 64–66.
梁瑞生, 吕晓旭. 信息光学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008. 15–17, 64–66.
- 16 Su Xianyu, Li Jitao. Information Optics[M]. Beijing: Science Press, 1999. 81–82.
苏显渝, 李继陶. 信息光学[M]. 北京: 科学出版社, 1999. 81–82.

栏目编辑:何卓铭