

自干涉非相干数字全息压缩感知重建

翁嘉文 杨初平 李海*

华南农业大学电子工程学院, 广东广州 510642

摘要 自干涉非相干数字全息可记录和再现非相干光源照明下物光场信息。但基于目前理论的重建算法对待测光场的不同纵向深度层面进行聚焦重构时, 聚焦面信息会受到离焦层面光场信息的干扰。基于压缩感知理论, 根据自干涉非相干数字全息的光学记录与再现过程, 建立与该物理过程相适应的传感矩阵, 从理论上构建实现光场分层重构的数值重建算法框架。基于自干涉非相干数字全息光路, 以多个不同纵向深度的LED点光源构建物光场, 分别进行计算机数值模拟及实验研究, 并且深入讨论光场层面再现距离与各实验参数之间的关系, 指出增大各光场层面再现距离间差距的方法。理论及实验研究结果表明该方法可重构不同纵向深度层面的三维物光场, 并有效抑制离焦层面光场信息的干扰。

关键词 全息; 数字全息; 离散光学信号处理; 逆反问题; 压缩感知

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0209001

Self-Interference Incoherent Digital Holography by Compressive Sensing

Weng Jiawen Yang Chuping Li Hai

College of Electronic Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong 510642, China

Abstract Self-interference incoherent digital holography (SIDH) retrieves the object information from the digital hologram illuminated by the incoherent light. However, the reconstructed image according to different sections will be disturbed by the out-of-focus sectional image by employing the traditional numerical reconstruction method. Therefore, a numerical reconstruction method for SIDH by employing compressive sensing (CS) is proposed to achieve the reconstruction of three-dimensional (3D) sectional image. Firstly, according to CS, the sensing operator is built up based on the physical mechanism of SIDH. And then, the recovery algorithm is employed for the image restoration. Numerical simulation and experimental research on SIDH employing several LEDs at different positions are performed to demonstrate the feasibility and validity of the method. In addition, the relationship of the reconstructed distance according to different sectional images and the experimental parameters is discussed. The analysis result shows that different sectional images can be reconstructed with the out-of-focus section information inhibited.

Key words holography; digital holography; discrete optical signal processing; inverse problems; compressive sensing

OCIS codes 090.1995; 070.2025; 100.3190

1 引言

数字全息^[1-3]基于光学全息的成像原理对光场进行记录, 并通过数值再现算法重构获得原物光场的信息。然而, 采用具有良好相干性的激光作为光源进行记录时, 会引入如散斑噪声以及由光路中光学元件的反射所产生的寄生干涉等噪声。为了减弱和消除这些噪声, 非相干光全息技术引起了人们的关注, 特别是非相干菲涅耳全息图的记录与再现。Rosen等^[4-5]提出的菲涅耳非相干全息术(FINCH)是其中一项重要进展。Kim等^[6-7]采用改进的Michelson干涉光路取代FINCH光路中的空间光调制器, 提出了自干涉非相干数字

收稿日期: 2015-06-09; 收到修改稿日期: 2015-08-24

基金项目: 国家自然科学基金(61307011)

作者简介: 翁嘉文(1979—), 女, 博士, 副教授, 主要从事数字全息方面的研究。E-mail: weng-jw@163.com

*通信联系人。E-mail: lee.361@163.com

全息术(SIDH)。该技术通过记录每个物光点的菲涅耳干涉图样得到全息图,并成功对原物光场进行重构。国内也展开了相关的非相干全息成像技术的研究^[8-10]。但基于目前的自干涉非相干数字全息重建算法对待测光场的不同纵向深度层面进行聚焦重构时,聚焦面信息会受到离焦层面光场信息的干扰,使得该技术在三维光场的重建中受到一定的限制。因此,有必要根据自干涉非相干数字全息的光学记录及再现过程构建新的重建算法,以实现光场的分层重构。

目前受到广泛关注的压缩感知理论^[11-12],是建立在矩阵分析、统计概率论、泛函分析与时频分析等基础上的一种新的信号描述与处理的理论框架,可对原始信号稀疏重构,在信号处理方面表现出了强大的生命力,特别是在高维图像信号的稀疏表示与重建方面拥有广阔的发展前景。近年,压缩感知理论成功地应用于数字全息重建当中。Brady等^[13]领导的小组基于标量衍射角谱理论,结合压缩感知理论实现三维物体同轴全息的稀疏重构。Rivenson等^[14-15]基于压缩感知理论实现对部分受阻挡物光场的不同纵向深度层面的重构再现。Zhang等^[16-17]通过将逆成像求解引入光学扫描全息术,重构不同纵向深度物光场图像。从物理机制上而言,对离焦层面光场信息的抑制与各光场层面间的再现距离的差异密切相关。而基于自干涉非相干数字全息术,该再现距离的差异可得到放大,这对于抑制各层面光场信息间的相互干扰,以实现分层重构再现是非常有利的。因此,在自干涉非相干数字全息术中引入压缩感知理论构建数值重建算法框架是非常有意义的。

本文结合压缩感知理论,根据自干涉非相干数字全息的光学记录过程,建立相应的理论框架,构建与该物理过程相适应的传感矩阵,结合两步迭代收缩阈值算法^[18]对所建立的观测模型求解最优化问题,实现对光场的分层重构再现。通过计算机数值模拟,对多组不同纵向深度的离散光源点进行重构,对比研究目前的自干涉非相干数字全息重建算法与基于压缩感知重建算法的再现结果,并且深入讨论光场层面再现距离与各实验光路参数的关系,指出增大各光场层面间再现距离差距的方法。最后,以两组不同纵向深度的LED光源点构建待测三维物光场展开实验研究。

2 自干涉非相干数字全息的压缩感知重建

2.1 压缩感知

压缩感知理论是基于信号的稀疏表示,通过低维空间采样数据的非相关观测来实现高维信号的感知。将一个含有 N 个离散点的一维信号 f 记为 $N \times 1$ 列向量,并用一组基 $\Psi = [\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_N]$ 的线性组合来表示:

$$f = \sum_{i=1}^N \alpha_i \psi_i, \text{ or } f = \Psi \alpha, \quad (1)$$

式中 Ψ 是 $N \times 1$ 的变换矩阵, α 为 $N \times 1$ 列,是 f 的加权系数序列,且 $\alpha_i = \langle f, \psi_i \rangle$,“ $\langle \rangle$ ”表示内积运算。当 α 具有 $K(K < N)$ 个非零系数,那么称 α 为信号 f 的 K 稀疏表示。采用一个与变换矩阵不相关的 $M \times N$ 的测量矩阵 Φ 对信号进行线性观测,可得到一个 $M \times 1$ 列的线性测量值

$$g = \Phi f = \Phi \Psi \alpha = \Theta \alpha, \quad (2)$$

式中 $\Theta = \Phi \Psi$ 为 $M \times N$ 的传感矩阵, $K < M \ll N$ 。由于 $M \ll N$,通过 g 求解 α 时,方程的个数远小于未知数的个数,因此该求解过程是一个病态问题。当 Θ 满足约束等矩特性,信号的稀疏重构可以转化为求解 l_1 范数最小化问题

$$\hat{\alpha} = \arg \min_{\alpha} \|\alpha\|_1, \text{ subject to } g = \Theta \alpha, \quad (3)$$

对于二维图像信号的重构,可采用整体变分(TV)算法,通过最优化重建二维图像信号。

$$\hat{f} = \arg \min_f \|f\|_{TV}, \text{ subject to } g = \Phi f, \quad (4)$$

式中

$$\|f\|_{TV} = \sum_{ij} \sqrt{(f_{i+1,j} - f_{i,j})^2 + (f_{i,j+1} - f_{i,j})^2}. \quad (5)$$

2.2 自干涉非相干数字全息

自干涉非相干数字全息术是基于物光点的自干涉原理进行全息图的记录,其实验光路原理如图1所示,其中凹面反射镜 M_A 和 M_B 到达分束镜(BS)的距离相同。由物点光源发出的光束进入改造后的 Michelson 干涉仪,由 BS 分成两束,入射至反射镜 M_A 和 M_B 后,经 BS 会合。由于 M_A 和 M_B 具有不同的曲率半径,即分别对来自物

光点的两束球面光加入了不同的位相调制,因此在 CCD 面上产生菲涅耳干涉图样。由于采用空间非相干照明,因此对于多个离散物光点以及连续物体所形成的全息图样可视为物面上所有物光点各自形成的菲涅耳干涉图样的线性叠加。

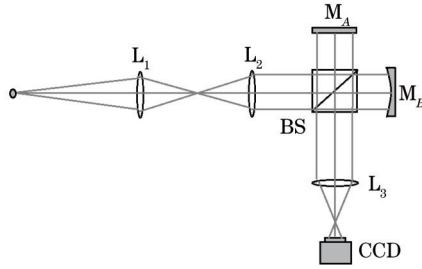


图 1 自干涉非相干数字全息实验光路原理图

Fig.1 Experimental apparatus for self-interference incoherent digital holography

先不考虑各透镜 L_1 、 L_2 及 L_3 , 将图 1 所示的光路转化为图 2 的等效光路进行理论分析。为简化数学描述,这里以一维情况展开讨论。其中 x_0 为物面坐标, x_m 为反射镜面坐标, x_c 为 CCD 面坐标, x_h 为再现像面坐标, x_A 和 x_B 分别表示 M_A 和 M_B 对应的成像面坐标。 z_0 为反射镜面与物面的距离, z_c 为反射镜面与 CCD 面的距离, z_h 为 CCD 面到达再现像面的距离, z_A 和 z_B 分别为 CCD 面到达 M_A 和 M_B 成像面的距离。 f_A 和 f_B 分别为 M_A 和 M_B 焦距。

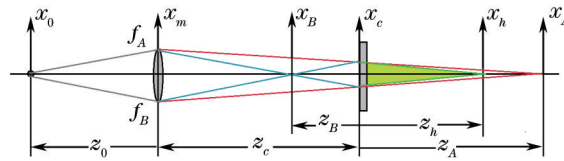


图 2 自干涉非相干数字全息等效光路系统

Fig.2 Equivalent optical system for self-interference incoherent digital holography

另外定义数学表达式

$$Q_z(x) = \exp\left(\frac{ik}{2z}x^2\right), \quad (6)$$

$$Q_{z_1}(x-x_1)Q_{z_2}(x-x_2) = Q_{z_1+z_2}(x_1-x_2)Q_{z_{12}}(x-x_{12}), \quad (7)$$

式中 $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, λ 为光波波长, $z_{12} = \frac{z_1 z_2}{z_1 + z_2}$, $x_{12} = z_{12} \left(\frac{x_1}{z_1} + \frac{x_2}{z_2} \right)$ 。

考虑单个物光点情况,到达反射镜面前的光场为

$$E_{m-}(x_m) = Q_{z_0}(x_m - x_0), \quad (8)$$

经 M_A 和 M_B 反射后的光场为

$$E_{m+}(x_m) = E_{m-}(x_m) [Q_{-f_A}(x_m) + Q_{-f_B}(x_m)], \quad (9)$$

到达 CCD 面的光场为

$$E_c(x_c) = \int dx_m E_{m+}(x_m) Q_{z_c}(x_c - x_m) = E_A(x_c) + E_B(x_c), \quad (10)$$

式中

$$\begin{cases} E_A(x_c) = Q_{z_0-f_A}(x_0)Q_{-z_A}(x_c - x_A) \\ E_B(x_c) = Q_{z_0-f_B}(x_0)Q_{-z_B}(x_c - x_B) \end{cases}, \quad (11)$$

因此在 CCD 面上所记录的干涉图样为

$$h_c(x_c) = |E_A(x_c)|^2 + |E_B(x_c)|^2 + E_A(x_c)E_B^*(x_c) + E_A^*(x_c)E_B(x_c). \quad (12)$$

将(6)、(7)式代入(11)式进行计算可得(12)式中的干涉项为

$$E_A(x_c)E_B^*(x_c) = Q_{z_h}(x_c - x_h), \quad (13)$$

式中 $z_h = -\frac{z_A z_B}{z_B - z_A}$, $x_h = -\frac{z_c}{z_0} x_0 = \gamma x_0$ 。

考虑多个离散物光点以及连续物体所形成的全息图样,该记录可视为各个物光场点的菲涅耳干涉图样强度的线性叠加。进一步推广至二维情况,结合相移技术或者空间滤波技术对全息图进行处理,消除直流分量及孪生项,提取干涉项可得复全息图为

$$H_c(x_c, y_c) = \iint dx_0 dy_0 I_0(x_0, y_0) Q_{z_h}(x_c - \gamma x_0, y_c - \gamma y_0) = I'_0(x_c, y_c) * Q_{z_h}(x_c, y_c), \quad (14)$$

式中 $I_0(x_0, y_0)$ 为原物光场强度, $I'_0(x_c, y_c) = I_0\left(\frac{x_c}{\gamma}, \frac{y_c}{\gamma}\right)$, 符号“*”表示卷积运算。因此,采用卷积运算对全息图进行数值重构可得

$$I'(x_c, y_c) = H_c(x_c, y_c) * Q_{-z_h}(x_c, y_c). \quad (15)$$

2.3 自干涉非相干数字全息的压缩感知重建

考虑多个位于不同纵向深度的物光场点,建立 z_h 与 z_0 的函数关系

$$z_h = -\frac{z_A z_B}{z_B - z_A} = -\frac{\left(\frac{z_0 f_A}{z_0 - f_A} - z_c\right) \left(\frac{z_0 f_B}{z_0 - f_B} - z_c\right)}{\frac{z_0 f_B}{z_0 - f_B} - \frac{z_0 f_A}{z_0 - f_A}} = \kappa(z_0), \quad (16)$$

另外,将(14)式所表示的测量过程改写为

$$H_c(x_c, y_c) = \mathfrak{F}_{2D}^{-1} \left\{ \iint \left\{ \mathfrak{F}_{2D} [I'_0(x_0, y_0, z_0)] \cdot \mathfrak{F}_{2D} [Q_{\kappa(z_0)}(x_c, y_c)] \right\} dz_0 \right\}, \quad (17)$$

式中“ \mathfrak{F}_{2D} ”和“ \mathfrak{F}_{2D}^{-1} ”分别表示二维傅里叶变换和二维逆傅里叶变换运算,且有

$$\mathfrak{F}_{2D} [Q_{\kappa(z_0)}(x_c, y_c)] = i\lambda \kappa(z_0) \exp[-i\pi\lambda \kappa(z_0)(\xi^2 + \eta^2)], \quad (18)$$

式中 (ξ, η) 为频域坐标。

对全息图以及物光场进行离散化处理。CCD的像素为 $N_x \times N_y$, 像素大小为 $\Delta_x \times \Delta_y$, 待测物光场划分为间隔为 $\Delta_x \times \Delta_y \times \Delta_z$ 的 $N_x \times N_y \times N_z$ 个三维采样区间。对(17)式进行离散化可得

$$H(p\Delta_x, q\Delta_y) = F_{2D}^{-1} \left\{ \sum_{l=1}^{N_z} \left[i\lambda \kappa(l\Delta_z) \cdot \exp[-i\pi\lambda \kappa(l\Delta_z)(m^2 \Delta\xi^2 + n^2 \Delta\eta^2)] \cdot F_{2D} \{ I'_0(m\Delta_x, n\Delta_y, l\Delta_z) \} \right] \right\}, \quad (19)$$

式中 $F_{2D}\{\}$ 和 $F_{2D}^{-1}\{\}$ 分别表示二维离散傅里叶变换和逆变换; $\Delta\xi = 1/(N_x \Delta_x)$, $\Delta\eta = 1/(N_y \Delta_y)$ 。

基于压缩感知理论重构原物光场,需要构造适应自干涉非相干数字全息记录过程的传感矩阵,然后结合压缩感知重构算法进行重构再现。因此,为适应压缩感知理论的观测过程,需将(19)式化为与(2)式相适应的矩阵表示,即确定传感矩阵。首先,将二维全息图以及物光场转化为一维向量表示,定义 $g_{(q-1)N_x+p} = H(p\Delta_x, q\Delta_y)$ 为全息图中第 p 行第 q 列的值, $f_{(l-1)(N_x \times N_y) + (n-1)N_x + m} = I'_0(m\Delta_x, n\Delta_y, l\Delta_z)$ 为物光场 $z = l\Delta_z$ 处物面第 m 行第 n 列的值。定义计算核 $[S_{ln}] = i\lambda \kappa(l\Delta_z) \cdot \exp[-i\pi\lambda \kappa(l\Delta_z)(m^2 \Delta\xi^2 + n^2 \Delta\eta^2)]$, 且 $T = [S_1 S_2 \dots S_{N_l}]$ 。并引入大小为 $(N_x \times N_y \times N_z) \times (N_x \times N_y \times N_z)$ 的 $B = \text{blddiag}(F_{2D}, F_{2D}, \dots, F_{2D})$ 矩阵展开对物光场的离散傅里叶变换计算,其中“blddiag”表示分块对角矩阵。则(19)式可表示为

$$g = F_{2D}^{-1} T B f = H f, \quad (20)$$

式中 $H = F_{2D}^{-1} T B$ 为对应的自干涉非相干数字全息记录过程的传感矩阵。最后,采用两步迭代收缩阈值算法对(20)式所表示的观测模型进行求解,重构原物光场。

3 数值模拟与分析

根据图2所示的等效光路系统进行数值模拟,比较基于卷积重建算法与基于压缩感知算法对原物光场的再现结果。引入三组不同纵向深度的离散光源点构建三维物光场,其中 $\lambda = 625 \text{ nm}$, $z_c = 80 \text{ mm}$, z_0 分别为

(75 mm, 77 mm, 72 mm), $f_A = 450$ mm、 $f_B = 600$ mm。CCD面光场为 25×25 mm, 512 pixel \times 512 pixel。首先基于四步相移全息技术, 模拟由各物点光源发出的光束经凹面反射镜 M_A 和 M_B 反射后叠加得到的四幅相移全息图样, 如图3所示。图4是基于相移技术获得的复全息图的强度及位相分布。根据(16)式可得 z_h 分别为 (6573.3 mm, 6384.1 mm, 6882.7 mm)。这意味着基于自干涉非相干数字全息术对原物光场进行记录和再现时, 原物光场中的 2 mm 和 3 mm 的纵向距离差距, 在进行数值再现时会被放大至 189.2 mm 和 309.3 mm, 这对于抑制各个层面光场信息的相互干扰以实现分层重构再现是非常有利的。图5分别为基于(15)式对应的卷积重建算法与基于压缩感知算法重构得到的再现光场强度分布。从主观视觉上可见, 采用卷积重建算法进行数值重构时, 聚焦层面的光场强度会受到其它离焦层面光场信息的干扰。而基于压缩感知算法对不同纵向层面进行数值重构时, 可以很好地抑制离焦层面光场信息的干扰, 以达到分层重构的目标。使用峰值信噪比(PSNR)对再现图像质量进行客观评价可得, 基于卷积重建算法重构图像 PSNR 为 [28.8622, 28.8631, 28.4298], 基于压缩感知算法重构图像 PSNR 为 [31.9586, 31.8828, 31.6623]。

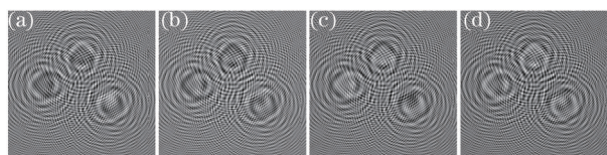


图3 四步相移非涅耳全息图样

Fig.3 Four phase-shifting holograms

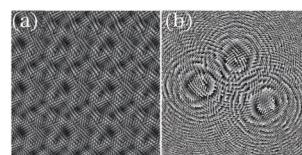


图4 复全息图强度(a)和相位(b)分布

Fig.4 Intensity (a) and phase (b) of the complex hologram

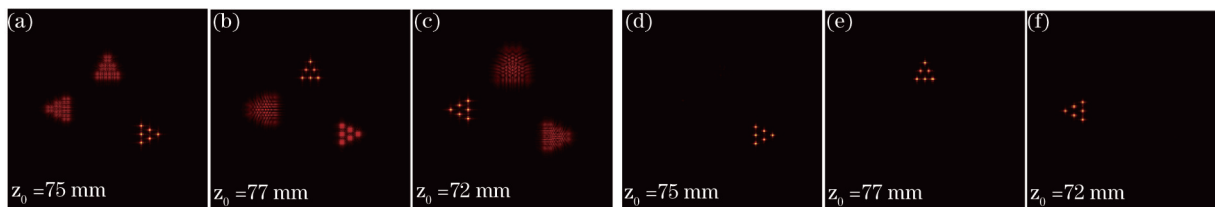


图5 基于卷积重建算法(a)~(c)和基于压缩感知重建算法(d)~(f)获得的不同层面再现光场强度分布

Fig.5 Reconstructed intensity according to different sections by correlation (a)~(c) and by compressive sensing (d)~(f)

从物理机制上而言, 对离焦层面光场信息的抑制与各光场层面间再现距离 z_h 的差异密切相关。(16)式反映了再现距离 z_h 与各实验参数之间的数值关系。首先考虑 (f_A, f_B) 对不同层面再现距离差异的影响。图6为当 $z_c = 100$ mm 时, 不同焦距反射镜组合所对应的 z_0 与 z_h 梯度绝对值的关系曲线图。可见, 通过选择焦距较大且两焦距差异较小的反射镜搭建光路系统可获得纵向再现距离差距的放大。另一方面考虑 (z_0, z_c) 对不同层面再现距离差异的影响。图7为 $f_A = 450$ mm、 $f_B = 600$ mm 时 z_h 与 (z_0, z_c) 关系的等高线示意图。图中使用箭头绘制了 z_h 的梯度向量分布, 箭头的长度代表了梯度绝对值的大小。可见, 可通过减小 z_0 和增大 z_c 以获得纵向再现距离差距的放大。但在实际测量中, 使用有限尺寸 CCD 对全息图进行采集时, 必须考虑对于发散球面波, 随着记录距离的增大, 光场的强度会随之快速下降, 而且所记录的全息图会丢失光场的高频信息。因此根据图2所示光路原理, 应避免 CCD 面位于 M_A 和 M_B 成像面之后。

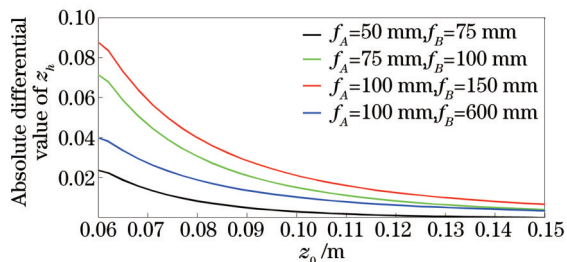


图6 不同焦距反射镜的组合对应的 z_0 与 z_h 梯度绝对值的关系曲线图

Fig.6 Relationship of z_0 and absolute derivative of z_h with different curved mirrors

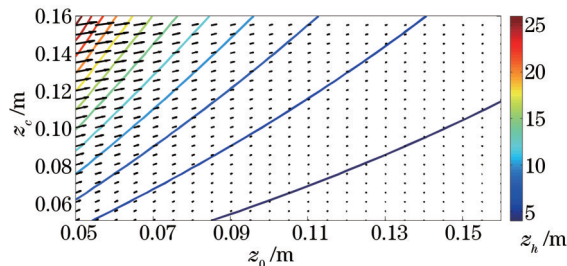


图7 z_h 与 (z_0, z_c) 关系图

Fig.7 Relationship of z_h and (z_0, z_c)

4 实 验

实验光路系统如图 1 所示,各透镜 L_1 、 L_2 及 L_3 焦距均为 100 mm, M_A 为平面反射镜, M_B 为焦距为 600 mm 的凹面反射镜。以两组不同纵向深度的 LED 光源点 ($\lambda = 625$ nm) 构建待测三维物体空间展开实验研究,一组为一红色 LED 位于 L_1 前约 450 mm,另一组为三个红色 LED 位于 L_1 前约 650 mm。经 L_1 后各个 LED 光源会聚成为理想离散物点光源,且两组光源点的纵向深度差距约为 11.2 mm。光路中 L_2 与 L_3 , M_A 与 M_B 均相对 BS 对称, L_2 与 M_B 、 L_3 与 M_A 距离均约为 200 mm。另外, L_1 与 L_2 距离约为 220 mm, L_3 与 CCD 面距离约为 150 mm。图 8 为 CCD 所记录的四幅相移全息图样,大小为 256 pixel \times 256 pixel (CCD 采集面为 6.3 mm \times 4.8 mm, 640 pixel \times 480 pixel)。图 9 为采用卷积重建算法与基于压缩感知算法重构的再现光场强度分布图。聚焦光场层面再现距离分别为 160 mm 和 240 mm,再现距离差距为 80 mm。实验与数值模拟再现结果一致表明,基于压缩感知算法可实现光场的分层重构,并很好地抑制各个层面光场信息的相互干扰。

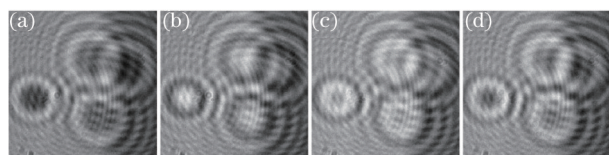


图 8 四步相移菲涅耳数字全息图样

Fig.8 Experimental four phase-shifting digital holograms

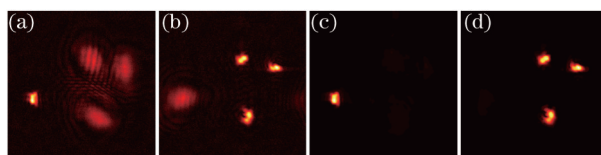


图 9 基于卷积重建算法(a)~(b)和基于压缩感知重建算法(c)~(d)获得的不同层面再现光场强度分布

Fig.9 Experimental reconstructed intensity according to different sections by correlation (a)~(b) and by compressive sensing (c)~(d)

5 结 论

本文针对目前自干涉非相干数字全息术对物光场分层重构所存在的不足,根据自干涉非相干数字全息的光学记录与再现过程,提出了基于压缩感知理论的数值重构算法。给出了传感矩阵构建的详细理论框架及过程,并进行数值模拟分析和实验研究。结果表明该方法对原物光场的不同纵向层面进行数值重构时,可抑制各个层面光场信息的相互干扰。另外,基于自干涉非相干数字全息术,对光场层面再现距离与各实验参数之间的关系进行了讨论,指出增大各光场层面再现距离差距的方法。目前模拟和实验讨论均是基于相移技术进行的,为适应动态物体的观测与记录,将进一步展开在离轴光路下自干涉非相干数字全息术的压缩感知重构的研究。

参 考 文 献

- 1 J W Goodman, R W Lawrence. Digital image formation from electronically detected holograms[J]. Appl Phys Lett, 1967, 11(3): 77-79.
- 2 U Schnars, W P Jueptner. Digital recording and numerical reconstruction of holograms[J]. Meas Sci & Technol, 2002, 13(9): R85-R101.
- 3 T Shimobaba, Y Sato, J Miura, *et al.*. Real-time digital holographic microscopy using the graphic processing unit[J]. Opt Express, 2008, 16(16): 11776-11781.
- 4 J Rosen, G Brooker. Digital spatially incoherent Fresnel holography[J]. Opt Lett, 2007, 32(8): 912-914.
- 5 J Rosen, G Brooker, GIndebetouw, *et al.*. A review of incoherent digital Fresnel holography[J]. Journal of Holography and Speckle, 2009, 5(2): 1-17.
- 6 M K Kim. Incoherent digital holographic adaptive optics[J]. Appl Opt, 2013, 52(1): A117-A130.
- 7 J Hong, M K Kim. Overview of techniques applicable of self-interference incoherent digital holography[J]. Journal of the European Optical Society Rapid Publications, 2013, 8: 13077.
- 8 Liu Yingchen, Fan Jinping, Zeng Fanchuang, *et al.*. Recording, reconstruction and realization of white-light Fresnel incoherent digital holography[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(10): 1009002.
刘英臣, 范金坪, 曾凡创, 等. 白光菲涅耳非相干数字全息的记录、再现及实现[J]. 中国激光, 2013, 40(10): 1009002.
- 9 Wan Yuhong, Man Tianlong, Tao Shiquan. Imaging characteristics and research progress of incoherent holography[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(2): 0209004.
万玉红, 满天龙, 陶世荃. 非相干全息术成像特性及研究进展[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0209004.

- 10 Guo Xiaole, Wan Yuhong, Man Tianlong, *et al.*. Correction characteristics of wavefront aberration in incoherent digital holographic adaptive optics[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(11): 1109004.
郭小乐, 万玉红, 满天龙, 等. 非相干数字全息自适应光学波前校正特性研究[J]. 中国激光, 2014, 41(11): 1109004.
- 11 D Donoho. Compressed Sensing[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(4): 1289–1306.
- 12 E Candes, M Wakin. An introduction to compressive sampling[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2008, 25(2): 21–30.
- 13 D J Brady, K Choi, D L Marks, *et al.*. Compressive holography[J]. Opt Express, 2009, 17(15): 13040–13049.
- 14 Y Rivenson, A Rot, S Balber, *et al.*. Recovery of partially occluded objects by applying compressive Fresnel holography[J]. Opt Lett, 2012, 37(10): 1757–1759.
- 15 Y Rivenson, A Stern, B Javidi. Compressive sensing for improved depth discrimination in 3D holographic reconstruction[C]. SPIE, 2013, 8738: 87380P.
- 16 Xin Zhang, E Y Lam, T C Poon. Reconstruction of sectional images in holography using inverse imaging[J]. Opt Express, 2008, 16(22): 17215–17226.
- 17 Haiyan Ou, T C Poon, K K Y Wong, *et al.*. Depth resolution enhancement in double-detection optical scanning holography[J]. Appl Opt, 2013, 52(13): 3079–3087.
- 18 J M Bioucas-Dia, M A T Figueiredo. A new twist: twostep iterative shrinkage/thresholding algorithms for image restoration[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2007, 16(12): 2992–3004.

栏目编辑: 何卓铭