

基于压缩传感的相移同轴傅里叶变换数字全息

裴 慧 杨振亚 郑楚君

(华南师范大学物理与电信工程学院, 广东 广州 510006)

摘要 对于同轴傅里叶数字全息,传统重构算法应用快速傅里叶逆变换算法进行重构,但采样过程需要满足香农采样定理,导致海量采样数据,大大增加了存储和传输的代价。提出了一种基于压缩传感的相移同轴傅里叶数字全息重构方法,利用马赫-曾德尔干涉光路采集同轴全息图,对采集数据进行部分采样、测量;然后利用最小全变分法对采集的数据进行数值再现。数值仿真结果表明,基于压缩传感的傅里叶全息重构算法优于基于快速傅里叶逆变换的传统算法,它将全息数据的采集和压缩合为一步进行,不仅采样数据明显少于传统采样数据,而且利用约8%的数据仍然能精确地重构出原图像。

关键词 数字全息术;压缩传感;相移全息;同轴傅里叶变换全息;数值重构

中图分类号 O438.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.040901

Phase-Shifting On-Axis Fourier Transform Digital Holography Based on Compressed Sensing

Pei Hui Yang Zhenya Zheng Chujun

(School of Physics and Telecommunication Engineering, South China Normal University, Guangzhou, Guangdong 510006, China)

Abstract In on-axis Fourier digital holography, the conventional way for image reconstruction is inverse fast Fourier transform (IFFT), but the Shannon's sampling theory must be satisfied in the sampling process, which causes the data redundancy and greatly increases the cost of storage and transmission. A reconstruction method of phase-shifting on-axis Fourier digital holography based on compressed sensing (CS) theory is put forward. Firstly, on-axis hologram is collected in the Mach-Zehnder interferometer light path. Then the collected data are partially sampled and measured. Lastly the image is numerically reconstructed by using the minimum total variation method. The numerical simulation result shows that the reconstruction method based on CS, which takes the sampling and compression of the hologram data to one step, is superior to that based on the conventional reconstruction method. The amount of sampling data based on CS is less than that based on IFFT, but the original image can also be accurately reconstructed from just about 8% hologram data.

Key words digital holography; compressed sensing (CS); phase-shifting holography; on-axis Fourier-transform holography; numerical reconstruction

OCIS codes 090.1995; 100.3010; 100.3190

1 引言

数字全息术^[1]的思想在1967年首次被提出,它采用CCD探测器记录全息图,并通过数值仿真实时再现记录物体。相比传统全息^[2],数字全息省去了传统全息再现过程中的显影、定影等繁琐步骤,已经被运用到了测量领域及成像领域。随着计算机技术的高速发展和高性能CCD的出现,数字全息的研究全面展开,并

收稿日期: 2012-11-26; **收到修改稿日期**: 2013-01-16; **网络出版日期**: 2013-03-11

基金项目: 国家自然科学基金(10504008)资助课题。

作者简介: 裴 慧(1986—),女,硕士研究生,主要从事数字全息、数字图像处理等方面的研究。

E-mail: poppy_ptt@163.com

导师简介: 郑楚君(1972—),男,副教授,硕士生导师,主要从事数字图像处理、数字全息、稀疏表示与压缩传感等方面的研究。E-mail: cjzheng@scnu.edu.cn(通信联系人)

受到越来越多研究人员的关注^[3~13]。由于记录数字全息图的 CCD 探测器分辨率低、有效孔径尺寸小等不足,使得数字全息重建^[4~7]像质较差。

为了改善数字全息中出现的以上问题,充分利用 CCD 的有效带宽,一般将相移技术^[8~10]与同轴数字全息相结合来改善数字全息图的重建质量。同轴相移数字全息技术^[9]通过多次拍摄全息图,消除同轴全息产生的零级衍射像和共轭像,提高了再现像的质量,但需要多次拍摄,而且采样过程需要遵循香农采样定理,造成了数据冗余。为了减轻采样负荷,一种新兴的采样理论即压缩传感(CS)理论^[14,15]被提出,它不同于传统采样定理,为数据采集技术带来突破,它的核心是将数据采集与压缩同时进行,然后根据相应的重构算法由测量值来重构原始信号^[14]。其优点是采样数据远远小于传统采样方法所获得的数据,但通过这些少量的采样数据仍然能精确重构原图像。近年来,为了解决数字全息中遇到的问题,特别是提高重建像的质量,压缩传感理论在数字全息中得到展开^[16~22],大多数研究者将压缩传感运用到菲涅耳域中。文献[16]证实了压缩传感理论框架能很好地应用于菲涅耳数字全息,通过 25%菲涅耳全息图压缩传感重构的图像质量与 100%菲涅耳全息图重建的图像质量相差不大。文献[22]基于惠更斯衍射原理,利用压缩传感技术对粒子的菲涅耳全息图进行重建,采集 25%的全息图数据仍能较好地重建截面,而且还实现了很好的聚焦和抗噪声能力。在相同的有限接收孔径下,和菲涅耳数字全息相比,傅里叶数字全息主要集中于 CCD 记录面的中心,能更多地接收到反映图像细节的高频成分,因此傅里叶数字全息常用于光信息存储领域。鉴于此,本文将相移同轴的傅里叶数字全息与压缩传感理论相结合。先利用 CCD 记录傅里叶数字全息图,对数字全息图进行采样、测量,然后分别用最小全变分(TV)法^[23~25]和传统重构算法^[4,5]即快速傅里叶逆变换(IFFT)进行数值重构,结果表明基于压缩传感理论的算法重构的图像质量远好于利用相同数据用传统方法重构的图像质量。

2 理论基础

2.1 四步相移同轴傅里叶变换全息图的原理及特点

同轴傅里叶变换全息的记录光路是马赫-曾德尔干涉光路,物体位于傅里叶透镜的前焦面上,如图 1 所示,一束激光经过扩束准直后,通过分束镜分成两束光波,一束光波作为参考光波,一束透过物体的光波作为物光波,在傅里叶透镜后焦面上用 CCD 探测器记录物光的频谱与参考光波干涉产生的傅里叶全息图。物体透射光波复振幅分布为 $O_0(x_0, y_0)$,在傅里叶透镜后焦面上记录的物光波复振幅分布为

$$O(f_x, f_y) = \iint_{-\infty}^{\infty} O_0(x_0, y_0) \exp[-j2\pi(f_x x_0 + f_y y_0)] dx_0 dy_0, \quad (1)$$

式中 f_x 和 f_y 为空间频率,且 $f_x = x_f/\lambda f$, $f_y = y_f/\lambda f$, f 是透镜的焦距, x_f 和 y_f 是后焦面上的位置坐标;参考波为垂直于 CCD 的平面波,本文分 4 次记录了 4 幅傅里叶全息图,每记录一次,改变参考光中相位为 $0, \frac{\pi}{2}, \pi$ 和 $\frac{3\pi}{2}$,即记录面上的参考光波光场分布为 $R(f_x, f_y) = R_0 \exp\left\{\frac{j[(i-1)\pi]}{2}\right\}$, $i = 1, 2, 3, 4$, R_0 为参考波常数项。

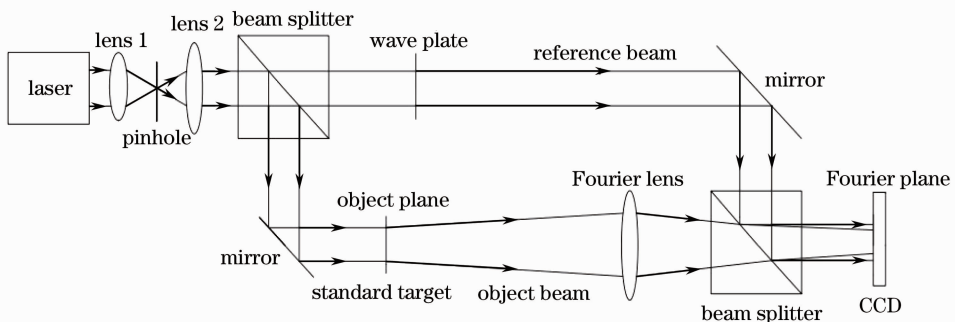


图 1 四步相移同轴傅里叶变换数字全息图的光学装置图

Fig. 1 Optical setup of four-step phase-shifting on-axis Fourier transform digital holographic recording

在 CCD 平面上记录的光波场强度分布为

$$I = |\mathbf{U}(f_x, f_y)|^2 = |O(f_x, f_y) + R(f_x, f_y)|^2. \quad (2)$$

CCD 采集到的 4 幅傅里叶全息图分别为

$$\begin{aligned} I_1(f_x, f_y) &= |O(f_x, f_y)|^2 + |R(f_x, f_y)|^2 + O(f_x, f_y)R^*(f_x, f_y) + O^*(f_x, f_y)R(f_x, f_y), \\ I_2(f_x, f_y) &= |O(f_x, f_y)|^2 + |R(f_x, f_y)|^2 + jO(f_x, f_y)R^*(f_x, f_y) - jO^*(f_x, f_y)R(f_x, f_y), \\ I_3(f_x, f_y) &= |O(f_x, f_y)|^2 + |R(f_x, f_y)|^2 - O(f_x, f_y)R^*(f_x, f_y) - O^*(f_x, f_y)R(f_x, f_y), \\ I_4(f_x, f_y) &= |O(f_x, f_y)|^2 + |R(f_x, f_y)|^2 - jO(f_x, f_y)R^*(f_x, f_y) + jO^*(f_x, f_y)R(f_x, f_y). \end{aligned} \quad (3)$$

由 CCD 采集到的 4 幅相位依次相差 $\frac{\pi}{2}$ 的傅里叶全息图,可以精确得出物光波频谱的复振幅分布,称相移全息图,即

$$O(f_x, f_y) = \frac{(I_1 - I_3) + j(I_2 - I_4)}{4R_0}. \quad (4)$$

然后对相移全息图直接进行快速傅里叶逆变换,就可精确地重构出原图像,并有效地去除零级衍射像与共轭像。而基于压缩传感的傅里叶数字全息是先对(3)式中的 4 幅傅里叶全息数据进行部分采样,通过(4)式得出部分采样数据,然后对部分采样的数据进行最小全变分算法重构,可精确再现原图像。

2.2 压缩传感重构的理论

压缩传感是一种全新的采样理论,主要包括信号的稀疏表示、编码测量和重构算法 3 个方面。压缩传感的基本思想就是把数据采集和压缩同时进行,从而减少采样数据量,减轻采样负荷,其所需采样量远小于满足采样定理所需的量。已经证明,对于长度为 N 的 K 稀疏信号,能够通过 $O(K \ln N)$ 次采样最大概率地实现无失真重构^[23]。

压缩传感理论中的重构算法是由 M 次测量值 \mathbf{y} 来重构长度为 N 的稀疏信号 \mathbf{x} 的过程。若图像 f 在某一变换基 Ψ (如小波基等)上可以稀疏表示,即 $f = \Psi \mathbf{x}$, \mathbf{x} 为图像 f 在 Ψ 变换域的稀疏表示;测量值 $\mathbf{y} = \Phi f$, 测量矩阵 $\Phi \in R^{M \times N}$, 维数 $M \ll N$, 则有

$$\mathbf{y} = \Phi f = \Phi \Psi \mathbf{x} = \mathbf{S} \mathbf{x}, \quad (5)$$

式中 \mathbf{S} 为 $M \times N$ 的传感矩阵,即 $\mathbf{S} = \Phi \Psi$ 。

从(5)式可以看出, \mathbf{y} 为稀疏信号 \mathbf{x} 关于传感矩阵 \mathbf{S} 的测量值。当 \mathbf{S} 满足约束等距条件时,可以通过求解最优 l_0 范数问题来重构稀疏信号 \mathbf{x} , 即

$$\hat{\mathbf{x}} = \operatorname{argmin} \|\mathbf{x}\|_0 \quad \text{s. t.} \quad \mathbf{S} \mathbf{x} = \mathbf{y}, \quad (6)$$

式中 $\|\cdot\|_0$ 为向量的 l_0 范数,表示向量 \mathbf{x} 中非零元素的个数。

然后将求解 f 的稀疏表示 \mathbf{x} , 通过变换基 Ψ 由 $\hat{f} = \Psi \hat{\mathbf{x}}$ 精确重构出图像 \hat{f} 。

如果图像是在梯度算符 ∇ 作用下具有稀疏性,则最优化重构算法称为最小全变分法^[24]。该问题可表述如下:

$$\hat{f} = \operatorname{argmin} \|\nabla f\|_1 \quad \text{s. t.} \quad \|\mathbf{U}f - \mathbf{Y}\|^2 \leq \xi, \quad (7)$$

式中 $\|\cdot\|_1$ 为 l_1 范数, \hat{f} 为重构图像。 \mathbf{U} 为采样算符, \mathbf{Y} 为测量数据, ξ 为重构误差。梯度算符 $\nabla = D_1 + iD_2$, 其中 D_1 为水平差分算子, D_2 为垂直差分算子。则 $\|\nabla f\|_1$ 可改写为

$$\|\nabla f\|_1 = \sqrt{(D_1 f)^2 + (D_2 f)^2}. \quad (8)$$

对于相移同轴傅里叶数字全息,采样算符 \mathbf{U} 为部分傅里叶变换, \mathbf{Y} 表示对(3)式中 4 幅傅里叶全息图分别经过相同的采样模板(如图 2 或图 3 所示)获得的数据 I'_1, I'_2, I'_3 和 I'_4 , 并由 $\frac{I'_1 - I'_3 + j(I'_2 - I'_4)}{4R_0}$ 得到的部分测量数据。

求解最优化问题具体分为两步。第一步是将每一次迭代的中间结果投影到傅里叶域,并使其满足傅里叶域约束条件(采样模板),再逆变换至物面,假设为 g ;第二步为求 TV 稀疏逼近:

$$\hat{f} = \operatorname{argmin} \|\nabla f\|_1 \quad \text{s. t.} \quad \|\mathbf{f} - \mathbf{g}\|^2 \leq \xi. \quad (9)$$

(9)式可描述为寻找 g 在偏差为 ξ 的一个 TV 稀疏逼近。本文求解(9)式使用的迭代算法为 Chambolle^[25] 所

提出的算法。

3 相移同轴傅里叶变换数字全息仿真及结果分析

3.1 仿真

相移同轴傅里叶变换数字全息的光路结构如图 1 所示。在计算机仿真中,光源采用 He-Ne 激光器,其波长为 632.8 nm; CCD 的分辨率为 $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$ (像素大小约为 $23 \mu\text{m} \times 23 \mu\text{m}$)。傅里叶透镜的焦距 $f' = 300 \text{ mm}$, 物体位于傅里叶透镜的前焦面, CCD 位于傅里叶透镜的后焦面上。通过马赫-曾德尔干涉光路引入垂直焦面的光波作为参考光,通过 $\frac{1}{4}$ 波片和 $\frac{1}{2}$ 波片分别产生 $0, \frac{1}{2}\pi, \pi$ 和 $\frac{3}{2}\pi$ 相移的参考光波,在后焦面上与物光形成 4 幅全息图。

仿真所用的图像为美国空军 (USAF) 分辨率板 (resolution target) 和 Cameraman, 如图 2(a) 和图 3(a) 所示, 尺寸均为 $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$; 参考光是垂直记录面的光波。图 2(c) 为采用 100% 傅里叶全息数据进行快速傅里叶逆变换的重建图像; 图 2(d) 为采用 8% 傅里叶全息数据进行快速傅里叶逆变换的重建图像; 图 2(e) 为采用 8% 傅里叶全息图压缩传感重建的图像; 图 3(b) 为采用 15% 傅里叶全息数据进行快速傅里叶逆变换的重建图像; 图 3(c) 为采用 15% 傅里叶全息图压缩传感重建的图像。

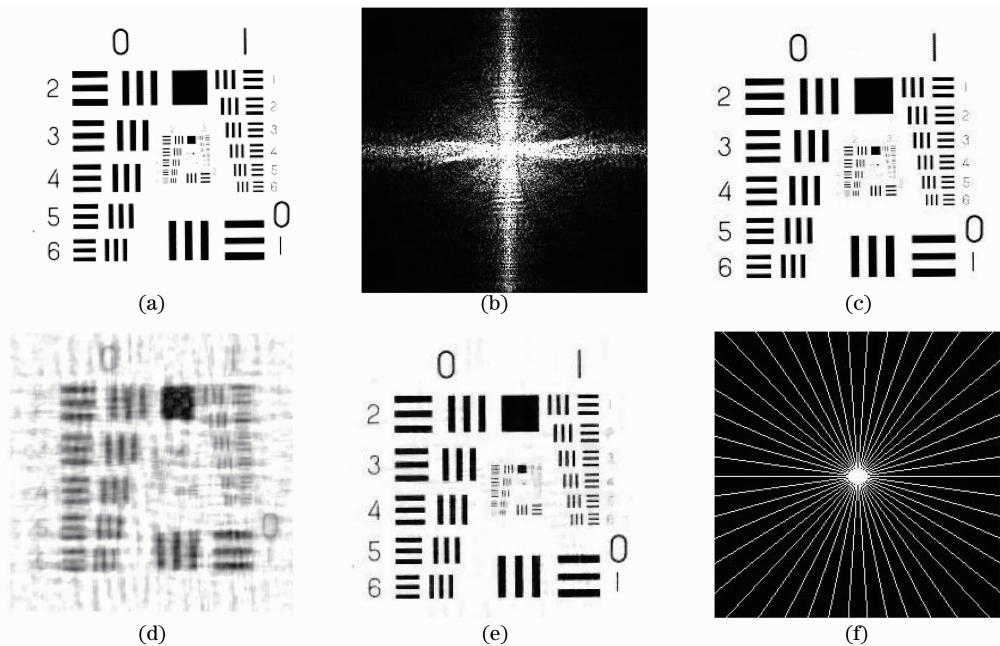


图 2 计算机模拟相移同轴数字全息图及重建图像光强。(a) USAF 分辨率板图像; (b) CCD 记录的第一步傅里叶全息图; (c) 100% 傅里叶全息图快速傅里叶逆变换重建图像; (d) 8% 傅里叶全息图快速傅里叶逆变换重建图像; (e) 8% 傅里叶全息图压缩传感重建图像; (f) USAF 分辨率板图像所采用的采样模板

Fig. 2 Simulated phase-shifting on-axis digital hologram and intensity of the reconstructed image. (a) The image USAF resolution target; (b) the first-step Fourier hologram recorded by the CCD; (c) reconstructed image of 100% Fourier hologram with IFFT; (d) reconstructed image of 8% Fourier hologram with IFFT; (e) reconstructed image of 8% Fourier hologram with CS; (f) sampling mask for the image USAF resolution target

3.2 实验结果分析与对比

在压缩传感中,采样矩阵一般为随机测量矩阵,但是使用随机测量矩阵不仅会使计算机存储量大,而且也没有很好的物理实现方法。为了应用傅里叶变换在光学采样中所具有的优势,文中采样模板的构造主要是根据傅里叶变换的特点,适量多采样靠近中心的数据。对于图像 USAF 分辨率板和 Cameraman,使用的采样模板分别如图 2(f) 和图 3(d) 所示,分别由自中心向四周的 23 条和 40 条等角度辐射线构成,大约占 8% 和 15% 的采样数据。这种采样方法在中心处采样的数据比其他地方要多,符合一般图像频谱的分布规律。

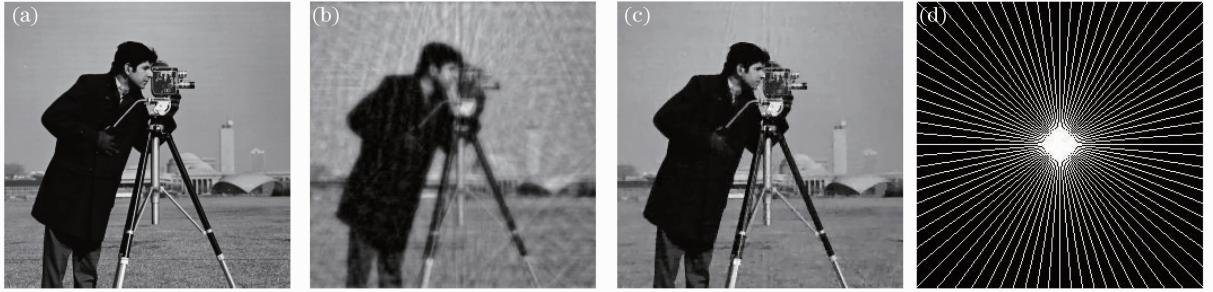


图3 计算机模拟相移同轴数字全息图及重建图像光强。(a)图像 Cameraman; (b) 15%傅里叶全息图快速傅里叶逆变换重建图像; (c) 15%傅里叶全息图压缩传感重建图像; (d) 图像 Cameraman 所采用的采样模板

Fig. 3 Simulated phase-shifting on-axis digital hologram and intensity of the reconstructed image. (a) Image Cameraman; (b) reconstructed image of 15% Fourier hologram with IFFT; (c) reconstructed image of 15% Fourier hologram with CS; (d) sampling mask for image Cameraman

在压缩传感重构的采样过程中,先将相同的采样模板依次与四幅傅里叶全息图相乘,只获取采样模板[图 2(f)和图 3(d)]所覆盖区域的数据,获得的测量数据分别为 I'_1, I'_2, I'_3 和 I'_4 ,然后通过 $\frac{I'_1 - I'_3 + j(I'_2 - I'_4)}{4R_0}$ 得出相移全息图的部分采样数据。由于傅里叶全息图记录的是物体透射光波的傅里叶变换,所以这种采样实质上相当于部分傅里叶变换算子采样。

与传统的傅里叶全息重构方法相比,基于压缩传感的重构只是随机采取全息图数据的一小部分,其采样数据取决于信号本身的稀疏特性,然后将随机采集的数据利用最小全变分方法^[23~25]来重构。

在仿真实验中,对于图像 USAF 分辨率板的傅里叶数字全息,通过采样模板[图 2(f)],将 8%傅里叶全息图压缩重构的结果[图 2(e)]和 100%傅里叶全息图传统重构的结果[图 2(c)]进行对比,基于压缩传感的傅里叶全息采样数据远小于传统重构采样,但是重构效果依旧很精确,去除了大量的冗余数据,减轻了采样负荷。采集相同的 8%傅里叶全息图数据,将 8%傅里叶全息图压缩重构结果[图 2(e)]和 8%傅里叶全息图传统重构结果[图 2(d)]进行比较,压缩重构图像的峰值信噪比(PSNR)为 28.3,而传统重构的图像峰值信噪比为 14.5,压缩重构图像质量明显比传统重构图像的质量好。

对于图像 Cameraman 的傅里叶数字全息,通过采样模板[图 3(d)],采集相同的 15%的傅里叶全息图数据,压缩重构图像[图 3(c)]的峰值信噪比为 28.9,而传统重构图像[图 3(b)]的峰值信噪比为 22.6,压缩重构图像质量比传统重构图像质量要好。

4 结 论

针对 USAF 分辨率板图和 Cameraman 图的数值再现,模拟了相移同轴傅里叶变换数字全息装置。对相移同轴傅里叶数字全息图进行数值重构,数值仿真结果表明基于压缩传感的傅里叶数字全息重构方法具有可行性和有效性。相比传统重建方法,基于压缩传感的相移同轴傅里叶全息的重构突破了香农采样定理的瓶颈,并利用较少的数据就能较精确地重构出图像。该方法有望在光学成像领域中的合成孔径技术和其他的全息术中得到利用,另外在三维视频中的压缩编码中,对于实时的采集压缩与光信息存储也有着潜在的应用价值。

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 D. Gabor. A new microscopic principle [J]. *Nature*, 1948, **161**(4098): 777~778
- 3 Thomas S. Huang. Digital holography [J]. *Proc. IEEE*, 1971, **59**(9): 1335~1346
- 4 Song Xiufa, Zhao Baoqun, Qin Aili. Comparison of three basic reconstruction algorithms in digital holography [C]. *SPIE*, 2009, **7283**: 728340

- 5 Li Junchang. FFT computation of angular spectrum diffraction formula and its application in wavefront reconstruction of digital holography [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5): 1163~1167
李俊昌. 角谱衍射公式的快速傅里叶变换计算及在数字全息波面重建中的应用[J]. 光学学报, 2009, **29**(5): 1163~1167
- 6 Wang Cunshuai, Zhang Yinke, Hao Jinbo *et al.*. Improving reconstruction image quality of digital holography using median filter and intensity subtraction [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(12): 120901
王存帅, 张引科, 郝劲波 等. 用中值滤波和光强相减法改善数字全息再现像质量[J]. 激光与光电子学进展, 2011, **48**(12): 120901
- 7 Zhang Yaping, Zhang Jianqiang, Xu Wei *et al.*. Elimination of the influence of zero-order diffraction using highpass filter in wavefront reconstruction [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(11): 1109002
张亚萍, 张建强, 许蔚 等. 波前重建中的高通滤波消零级衍射干扰研究[J]. 光学学报, 2011, **31**(11): 1109002
- 8 Yamaguchi Ichirou, Zhang Tong. Phase-shifting digital holography [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(16): 1268~1270
- 9 Lü Xiaoxu, Zhang Yimo, Zhong Liyun *et al.*. Analysis and experiment of phase-shifting coaxial lensless Fourier digital holography [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 Chujun Zheng, Peng Han, Hongsen Chang. Four-quadrant spatial phase-shifting Fourier transform digital holography for recording of cosine transform coefficients [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(3): 145~147
- 11 Li Junchang. Introduction of digital color holographic wavefront reconstruction algorithm [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(5): 0501001
李俊昌. 彩色数字全息波前重建算法概论[J]. 中国激光, 2011, **38**(5): 0501001
- 12 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
- 13 Miao Zhengxiang, Li Chongguang, Zhang Zhongheng *et al.*. Recording condition analysis of in-line digital hologram using given sampling frequency [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(11): 110901
缪正祥, 李重光, 张中恒 等. 给定抽样频率下同轴数字全息记录条件分析[J]. 激光与光电子学进展, 2012, **49**(11): 110901
- 14 D. L. Donoho. Compressed sensing [J]. *IEEE Trans. Information Theory*, 2006, **52**(4): 1289~1306
- 15 E. J. Candes. Compressive sampling [C]. Proceedings of International Congress of Mathematicians, 2006, **3**: 1433~1452
- 16 Yair Rivenson, Adrian Stern, Bahram Javidi. Compressive Fresnel holography [J]. *Display Technology*, 2010, **6**(10): 506~509
- 17 Marcio M. Marim, Michael Atlan, Elsa Angelini *et al.*. Compressed sensing with off-axis frequency-shifting holography [J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(6): 871~873
- 18 Marcio Marim, Elsa Angelini, Jean-Christophe Olivo-Marin *et al.*. Off-axis compressed holographic microscopy in low-light conditions [J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(1): 79~81
- 19 Yair Rivenson, Adrian Stern. Conditions for practicing compressive Fresnel holography [J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(17): 3365~3367
- 20 Sehoon Lim, Daniel L. Marks, David J. Brady. Sampling and processing for compressive holography [J]. *Appl. Opt.*, 2011, **50**(34): H75~H86
- 21 Yair Rivenson, Alon Rot, Sergey Balber *et al.*. Recovery of partially occluded objects by applying compressive Fresnel holography [J]. *Opt. Lett.*, 2012, **37**(10): 1757~1759
- 22 Wu Yingchun, Wu Xuecheng, Wang Zhihua *et al.*. Reconstruction of digital inline hologram with compressed sensing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(11): 1109001
吴迎春, 吴学成, 王智化 等. 压缩感知重建数字同轴全息[J]. 光学学报, 2011, **31**(11): 1109001
- 23 E. J. Candes, J. Romberg, T. Tao. Robust uncertainty principles: exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information [J]. *IEEE Trans. Information Theory*, 2006, **52**(2): 489~509
- 24 L. I. Rudin, S. Osher, E. Fatemi. Nonlinear total variation based noise removal algorithms [J]. *Phys. D*, 1992, **60**(1-4): 259~268
- 25 Antonin Chambolle. An algorithm for total variation minimization and applications [J]. *J. Mathematical Imaging and Vision*, 2004, **20**(1-2): 89~97