

三维复杂场景的非涅耳全息图频域压缩重建

汪香香, 张 成*, 沈 川, 张 凯, 汪 烨, 韦 穗

安徽大学计算智能与信号处理教育部重点实验室, 安徽 合肥 230039

摘要 针对三维物体计算机产生全息图信息的相似性和冗余性问题, 提出了一种基于三维总变分稀疏模型复杂三维场景的非涅耳全息图频域压缩重建方法。首先通过计算获得了三维物体的非涅耳全息图, 然后利用概率密度函数服从指数分布的非相干变密度频域下采样模式对非涅耳全息图的频域进行频域下采样操作, 最后利用压缩感知重构算法对下采样后的全息图频域信息进行频域压缩重建。模拟实验验证了该方法的可行性, 相比于传统的利用高斯随机测量矩阵对全息图空域的下采样模式, 所提方法能够显著提高重构图像的峰值信噪比, 这方法尤其适用于低采样率情况下。

关键词 全息; 压缩感知; 频域下采样; 图像重建

中图分类号 O438 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0709001

Frequency Domain Compressive Reconstruction of Fresnel Hologram for Complex Three-Dimensional Object

Wang Xiangxiang, Zhang Cheng, Shen Chuan, Zhang Kai, Wang Ye, Wei Sui

Key Laboratory of Intelligent Computing and Signal Processing, Anhui University, Hefei, Anhui 230039, China

Abstract Aiming at the problem of similarity and redundancy of information of three-dimensional (3D) object hologram generated by computer, a method which based on 3D total variation sparse model to realize frequency domain of Fresnel hologram's reconstruction of complex 3D object is proposed in this paper. Firstly, the Fresnel hologram of 3D object is obtained by using computation; then, the frequency domain of Fresnel hologram is sub-sampled by using the incoherent variable density sub-sampling pattern of frequency domain with probability density function obeying exponential distribution; finally, the sub-sampling frequency domain of hologram can be reconstructed by using compressive sensing reconstruction algorithm. Simulation experiments verify the feasibility of the method, compared with the traditional method of using Gauss random measurement matrix to subsample the spatial domain of hologram, the method proposed in this paper can improve the peak signal to noise ratio of the reconstructed image, especially in the condition of low-sampling rate.

Key words holography; compressive sensing; sub-sampling in frequency domain; image reconstruction

OCIS codes 090.1760; 100.6950; 070.2615; 100.3010

1 引 言

全息显示可满足人眼所有的视觉深度暗示, 为人眼提供最真实的三维感受, 是未来三维显示的终极目标。计算机产生全息图(CGH)技术具有高灵活性, 可以将物光波场的数学描述直接编码成全息图, 被认为

收稿日期: 2017-02-15; 收到修改稿日期: 2017-04-05

基金项目: 国家自然科学基金(61377006, 61501001, 61301296, 61605002)、安徽省自然科学基金(1508085MF121, 1608085QF161)、安徽省高等学校自然科学研究项目(1508085MF121, 1608085QF161)、安徽省高等学校自然科学研究项目(KJ2015A114, KJ2016A029)、NSFC-广东联合基金项目(U1201255)

作者简介: 汪香香(1993—), 女, 硕士研究生, 主要从事计算全息方面的研究。E-mail: wx18256090561@sina.com

导师简介: 韦 穗(1946—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事计算视觉与三维全息显示等方面的研究。

E-mail: swei@ahu.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: question1996@163.com

是能够为数字全息显示提供内容的好方法。

1966年, Lohmann等^[1]引入第一幅CGH, 标志着计算全息技术的真正问世。1992年, Stein等^[2]提出传统的点源方法, 但物体的采样点数量与计算效率成反比。为了加快全息图的计算速度, Matsushima等^[3]提出了计算全息“面元法”, 该方法将三维物体离散为几何多边形(通常离散为三角形), 相比点源方法, 其采样量至少减少了3个数量级; 但该方法仅适用于简单模型, 对于复杂的三维场景, 其计算量依然巨大^[4]。为了减小计算量, Trester等^[5]提出了计算全息“层析法”, 该方法认为三维物体由多层截面构成, 全息面的总复振幅可通过各层面的复振幅叠加得到, 该方法具有对三维物体复杂程度不敏感等优点, 因而得到了广泛应用。由于离轴菲涅耳全息图(FCGH)同时记录了物体的振幅和相位信息, 理论上包含了大量的冗余信息, 从而使得用有限样本来推断整个全息图信息成为可能^[6]。

数字全息技术能够同时满足压缩感知理论模型的稀疏性和非相干性两个前提条件。Brady等^[7-8]结合压缩感知理论, 对位于不同距离处的蒲公英图像构成的三维物体实现了同轴全息的稀疏重构, 并对具有散射性质的物体实现了离轴压缩重建。Stern等提出了压缩菲涅耳全息术^[9], 并利用压缩菲涅耳全息术实现了部分遮挡物的重建^[10], 然后将菲涅耳全息术扩展到利用单次曝光同轴压缩全息术来改善重构对象的深度分辨率^[11]等成像领域。

此外, 上海大学的伍小燕等^[12]运用压缩感知技术开展了基于光学 $4f$ 系统的放大同轴全息层析重建的研究。华南农业大学的翁嘉文等^[13]利用压缩感知技术重建了离轴菲涅耳全息图, 并实现了基于物点自干涉非相干光源的数字全息压缩重建^[14], 以及弱相干光条件下数字全息图的压缩重建^[15]。Endo等^[16-17]对基于图形处理器(GPU)加速的压缩全息和压缩菲涅耳全息算法进行了研究。Liu等^[18]利用压缩全息技术对三维点云对象进行了压缩重建。

北京邮电大学的曹雪梅等^[19]利用压缩感知技术对一个复杂三维场景的FCGH进行了重建, 该方法使用彩色图和深度图来合成计算三维复杂场景的FCGH, 不仅使得重构图像的质量大大提高(与直接使用反向传播相比), 而且计算量大大降低(与计算全息点云法和面云法相比)。在此基础上, 本课题组提出了一种基于三维总变分(3DTV)稀疏模型的非涅耳全息图频域压缩重建方法, 通过引入概率密度函数服从指数分布的变密度频域下采样模式^[20], 以FCGH频域下的采样压缩重建代替FCGH空域下的采样压缩重建, 数值模拟实验证明, 在FCGH频域低采样率压缩重构情况下, 变密度频域下采样模式能够显著提高重构图像的峰值信噪比, 在指数分布变密度频域低采样率下的压缩重建图像质量优于文献[19]中FCGH空域下采样压缩重构结果。

2 菲涅耳全息图压缩重构

文献[19]中计算复杂三维场景FCGH的主要思想是: 首先利用深度图将一个复杂三维场景的彩色图强度划分成多个切片层; 然后利用欠采样的高斯随机测量矩阵对FCGH进行测量, 得到空域下采样的FCGH数据; 最后利用带有总变分(TV)稀疏约束的压缩感知理论模型对空域下采样后的FCGH进行不同切片层的压缩重建。FCGH压缩感知(CS)重建的原理如图1所示。

基于深度图的值, 为了缩短计算时间, 并保证在每一层重建物面中有足够的信息聚焦, 同一深度区间范围内的点被视为同一层, 深度间隔 δ 可以根据深度值的范围以及所分的层数进行设置。第 i 个物面到全息面的距离 d_i 可以根据 $d_i = d_0 - i\delta$ 计算得到。其中 d_0 为距离全息图最远的物面距离, $d_0 = 500$ mm。

根据层析法的原理, 整个三维场景的总FCGH可以由各层物面的FCGH叠加得到, 同时FCGH的计算可以用角谱法(ASM)实现^[21]。

文献[19]中利用高斯随机测量矩阵对全息图的空域进行下采样操作, 虽然高斯随机测量矩阵所需测量次数少, 但是矩阵元素占用的存储空间大。本文利用全息图频域的能量集中在其中心低频区域的先验信息, 引入一种中心密度大、边缘密度小的指数分布变密度频域下采样模式, 并将其运用到FCGH的频域下采样用以代替高斯随机测量矩阵直接对全息图空域下采样^[22-23]。与文献[19]相比, 该方法计算简单且容易实现, 尤其是在低采样率下, 对全息图频域压缩重构图像的峰值信噪比远高于全息图空域压缩重构图像的峰值信噪比。

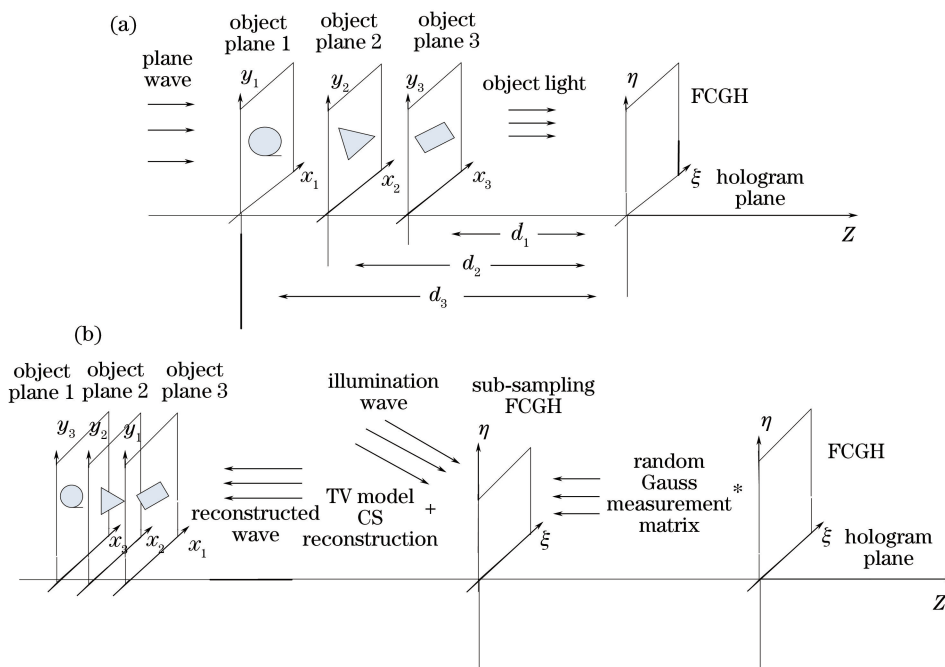


图 1 FCGH 压缩重建原理图。(a)全息图记录;(b)全息图压缩重建

Fig. 1 Schematic diagram of compressive reconstruction of FCGH. (a) Recording of hologram; (b) compressive reconstruction of hologram

3 菲涅耳全息图频域压缩重构

以文献[19]中的方法为基础,通过使用 FCGH 的变密度频域下采样方式,以代替高斯随机测量矩阵对 FCGH 的空域下采样,从而得到 FCGH 频域压缩重建方法。FCGH 的记录以及频域压缩感知重建的原理如图 2 所示。

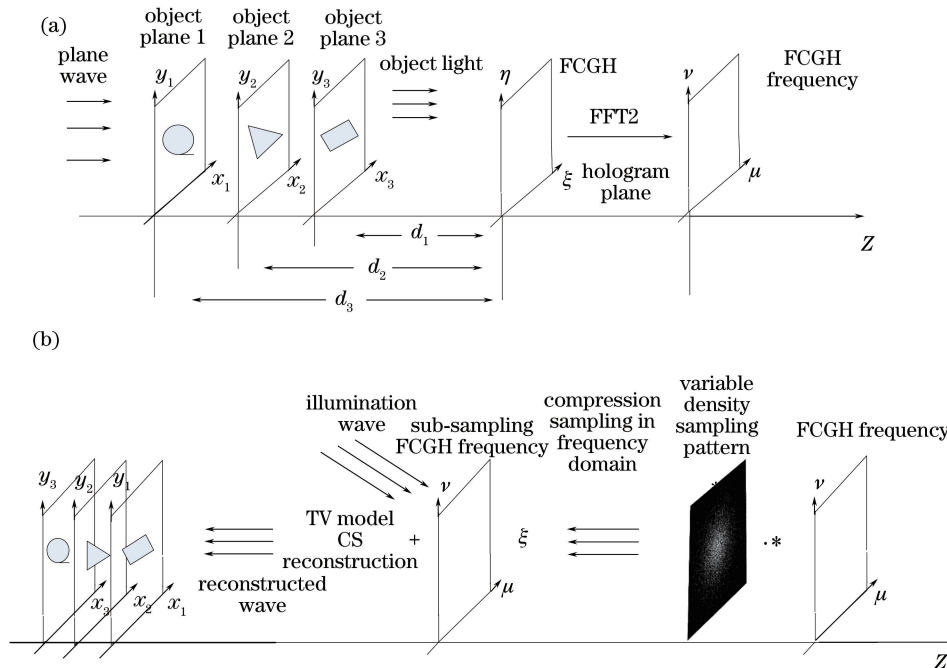


图 2 FCGH 频域的压缩重建原理。(a)全息图频域记录;(b)全息图频域压缩重建

Fig. 2 Schematic diagram of compressive reconstruction of FCGH frequency. (a) Recording of hologram frequency domain; (b) compressive reconstruction of hologram frequency domain

图 2(a)描述了 FCGH 频域的记录过程。利用深度图将彩色图的强度划分为不同的切片层,将每一切片层对菲涅耳全息面的贡献进行叠加得到总 FCGH 的分布,然后将全息图空域信息变换到其频域上。图 2(b)描述了 FCGH 频域的压缩重建过程。由于指数分布变密度频域下采样模式的非相干性较低,能更好地采集重构所需的主要信息,故而利用该模式对全息图频域进行下采样。需要注意的是,不同下采样模式的选择至关重要^[23],由于信息在频率域上的分布是不均匀的,所以下采样模式应该根据信息在频率域上的分布特性进行独特的设计。最后利用压缩感知重建算法对下采样的全息图频域信息实现全息图的频域压缩重建。

假设一个复杂的三维场景 f 分为 N_z 层,每层采样点个数为 $N_x \times N_y$ 。为适应压缩感知线性映射条件,使用轴向干涉测量法将目标空间三维矩阵、全息图频域下采样数据以及全息图记录感知系统转化为矩阵向量的形式,如(1)式所示:

$$\mathbf{E}_F = \mathbf{H}f = 2\text{Re}\{\mathbf{B}\mathbf{F}^{-1}\mathbf{Q}\mathbf{B}f\} + e, \quad (1)$$

$$\mathbf{E}_F = \mathbf{E}_F \cdot * \mathbf{M}_U, \quad (2)$$

$$\mathbf{Q} = [\mathbf{P}_1 \mathbf{P}_2 \cdots \mathbf{P}_{N_z}], \quad (3)$$

$$\mathbf{B} = \text{bdiag}(\mathbf{F}, \mathbf{F}, \cdots, \mathbf{F}), \quad (4)$$

式中 \mathbf{E}_F 为全息图的频域下采样测量值; \mathbf{H} 为全息图频域记录感知矩阵; Re 表示取矩阵的实部; \mathbf{B} 为由矩阵 \mathbf{F} 组成的块对角矩阵, $\mathbf{B} \in \mathbf{C}^{(N_x \times N_y \times N_z) \times (N_x \times N_y \times N_z)}$; \mathbf{Q} 由对角矩阵 \mathbf{P}_i 组成, $\mathbf{Q} \in \mathbf{C}^{(N_x \times N_y) \times (N_x \times N_y \times N_z)}$; \mathbf{P}_i 为点扩散函数的傅里叶变换所构成的对角矩阵, $\mathbf{P}_i \in \mathbf{C}^{(N_x \times N_y) \times (N_x \times N_y)}$ ^[19]; e 为常量,表示固有的模型误差; \mathbf{M}_U 为频域变密度下采样模式生成的二值矩阵;符号 $\cdot *$ 表示矩阵的点乘; \mathbf{E}_F 为全息图的频域测量值; \mathbf{F} 为 2D 傅里叶变换矩阵, $\mathbf{F} \in \mathbf{C}^{(N_x \times N_y) \times (N_x \times N_y)}$; \mathbf{F}^{-1} 为 2D 傅里叶逆变换矩阵, $\mathbf{F} \in \mathbf{C}^{(N_x \times N_y) \times (N_x \times N_y)}$; 目标三维矩阵 $f = [f_1^T f_2^T \cdots f_{N_z}^T]^T \in \mathbf{C}^{N_x \times N_y \times N_z}$, 且 $f_i \in \mathbf{C}^{N_x \times N_y}$; $\text{bdiag}(\cdot)$ 表示的是块对角矩阵。

由于 $(N_x \times N_y) < (N_x \times N_y \times N_z)$, 故(1)式中线性系统的求解是一个病态的逆问题,且没有唯一解。但是,利用压缩感知重构算法对该欠定方程进行求解时,该方程在很大概率上会有唯一解^[16]。在本文中, f 被假定为是梯度稀疏,且 f 的重构可以通过求解等式(5)来实现:

$$\hat{f} = \arg \min \| \mathbf{E}_F - 2\text{Re}\{\mathbf{B}\mathbf{F}^{-1}\mathbf{Q}\mathbf{B}f\} \|_2 + \tau \| f \|_{\{\text{TV}, \text{3DTV}\}}. \quad (5)$$

在压缩感知的重构过程中,(5)式的求解是从全息图的频域下采样测量值 \mathbf{E}_F 中获得估计值 f 。在(5)式中,第一项是保真项,用于确保恢复的估计值符合相应的测量值的约束。第二项是正则化项,用来保持边缘信息,且用于度量相应图像的稀疏度,即 TV 模型;变量 τ 是正则化参数。其中,TV 函数^[24]与 3DTV 函数^[25]被分别定义为(6)式和(7)式:

$$\| f \|_{\text{TV}} = \sum_{k=1}^{N_z} \sum_{j=1}^{N_y} \sum_{i=1}^{N_x} \sqrt{(f_{i+1,j,k} - f_{i,j,k})^2 + (f_{i,j+1,k} - f_{i,j,k})^2 + (f_{i,j,k+1} - f_{i,j,k})^2}, \quad (6)$$

$$\| f \|_{\text{3DTV}} = \sum_k \left\{ \sum_{i \in \Theta} \{D_i [\text{Re}(f)] (\Gamma)\}^2 + \{D_i [\text{Im}(f)] (\Gamma)\}^2 \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad (7)$$

式(7)中, $\Theta = [h, v, a]$; D_h, D_v, D_a 分别为水平、垂直和纵向的微分算子; Γ 为访问每层图像的每个像素点的操作。

最终使用两步迭代收缩/阈值算法(TwIST)^[26]求解(5)式频域下采样情况下的优化问题。

4 数值实验

4.1 重构图像的质量评估

峰值信噪比(R_{PSN})通常在有损压缩中^[6]被用来测量重构图像的质量,是一个近似于人类感知的图像重建质量指标,被定义为:

$$R_{\text{PSN}} = 10 \times \lg [(2^n - 1)^2 / E_{\text{MS}}], \quad (8)$$

$$E_{\text{MS}} = \frac{1}{M \times N} \sum_{i,j}^{M,N} [X(i,j) - Y(i,j)]^2, \quad (9)$$

式中 E_{MS} 为均方根误差; n 为每个像素的位数, $n = 8$; $X(i,j)$ 和 $Y(i,j)$ 为原始图像和重构图像在坐标 (i,j)

处的像素值; $M \times N$ 为图像的像素总个数。

4.2 模拟实验

本节主要给出相应的数值模拟实验,根据文献[19]的步骤及参数设置,实验分为 A,B,C,D 组。实验 A:在 3DTV 模型下,采用指数分布变密度频域下采样模式对固定采样率的 FCGH 频域进行压缩重建。实验 B:在 TV 模型和 3DTV 模型下,利用指数分布变密度频域下采样模式,对不同采样率下重建图像的性能进行对比。实验 C:在 3DTV 模型下,利用指数分布变密度频域下采样模式、径向线频域下采样模式和均匀频域下采样模式对 FCGH 频域数据进行下采样,并将重建图像的质量进行对比,实验结果都是通过数值定量地分析重构图像的峰值信噪比质量指标。实验 D:在 3DTV 模型下,利用指数分布变密度频域下采样模式对全息图频域进行下采样,并将不同采样率下的重构结果与文献[19]进行对比。

4.2.1 实验 A

三维物体的分层过程与固定采样率下 FCGH 的频域压缩重建过程如图 3(a)与 3(b)所示。当重构距离逐渐从 494.8 mm 减小到 484.4 mm 时,可以获得相应重构距离处的快速聚焦部分。由于从二维全息图中产生不同的二维重构图是一个非适定的逆问题,故从全息面反向传播到原对象平面的情况下,产生了离焦像与聚焦像相互干扰的现象,最终导致图像失真,如图 3(c)所示。

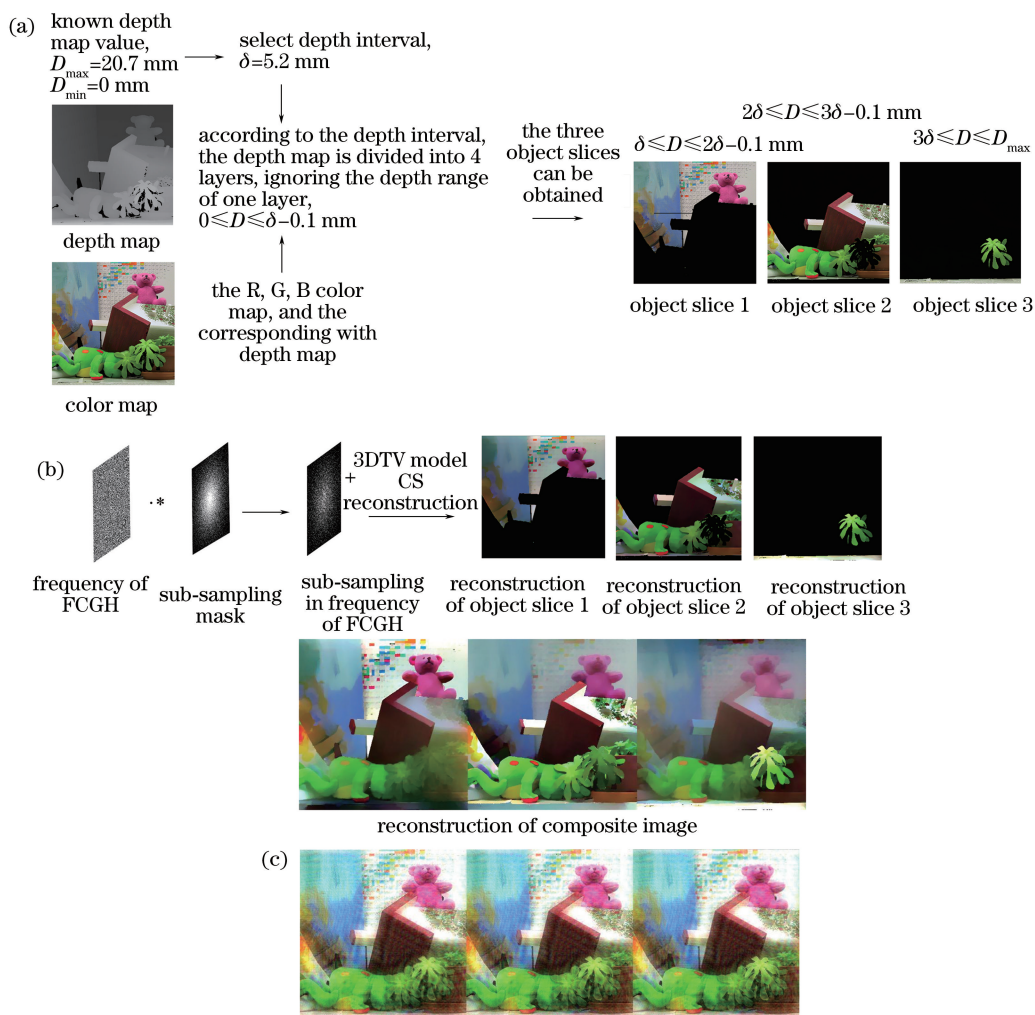


图 3 固定采样率下 FCGH 频域压缩重建。(a)三维物体的构造划分;(b)固定采样率下全息图频域压缩重建过程;(c) FCGH 的数值反向传播

Fig. 3 compressive reconstruction of FCGH frequency at fixed sampling rate. (a) Structural division of three dimensional object; (b) process of frequency domain compressive reconstruction at fixed sampling rate; (c) numerical backpropagation of FCGH

4.2.2 实验 B

为进一步提高重建焦平面图像的质量,提出采用 3DTV 代替 TV 进行优化,对象的估计是通过 3DTV 基础上稀疏约束代替 TV 基础上稀疏约束来实现迭代更新的。在 3DTV 模型及 TV 模型下,采用指数分布变密度频域下采样模式对不同采样率下的重构图像进行比较,对比结果如表 1 所示。

表 1 3DTV 模型和 TV 模型重构图像的峰值信噪比

Table 1 Peak signal to noise ratio of reconstruction image with 3DTV model and TV model

Propagation distance d_i/mm	3DTV model				TV model			
	Sub-sampling rates /%				Sub-sampling rates /%			
	60	50	40	30	60	50	40	30
d_1	23.8728	21.9844	21.5739	21.3270	22.4471	21.2347	21.0166	21.3009
d_2	26.5269	25.5635	24.2613	23.6908	25.9570	25.1806	24.0640	22.6438
d_3	25.2103	25.2080	25.2701	25.5557	25.0360	24.6712	25.2036	25.1084

由表 1 可以看出,在不同的频域采样率下,TwIST 算法附加对象的 3DTV 稀疏约束模型的压缩重建结果,要优于 TwIST 算法附加对象的 TV 稀疏约束模型的压缩重建结果。用于度量相应图像稀疏度的 3DTV 模型是在复数域中定义的,复数的实部和虚部是分开的,相比 TV,3DTV 更好地利用了相邻像素之间的相关性,可以得到信号的更稀疏的表示,从而在相同测量数目条件下得到更优的重建结果。

4.2.3 实验 C

在 3DTV 模型下,利用指数分布变密度频域下采样模式、均匀频域下采样模式及径向线频域下采样模式,分别对 FCGH 频域数据进行下采样操作,采样率为 25% 的指数分布变密度频域下采样模式、径向线频域下采样模式以及均匀频域下采样模式如图 4 所示。实验选取 3 种不同的下采样模式,且使用采样率分别为 60%,50%,40%,30% 时的 FCGH 频域数据进行压缩重构。其中,采样率的大小是采样矩阵中 1 的个数占矩阵元素总个数的比值。由于采用的变密度下采样矩阵具有随机性,每次下采样采集的全息图频域数据并不完全相同,所以每次实验分别重复 10 次,然后取平均值以提高准确度。重构图像的质量指标用峰值信噪比函数进行评价,对比结果如表 2 所示。

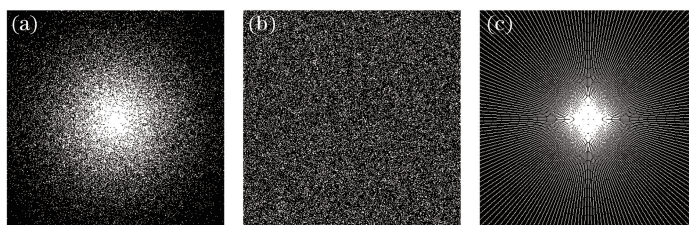


图 4 采样率为 25% 时的 3 种下采样模式。(a) 指数分布变密度频域下采样模式;(b) 径向线频域下采样模式;(c) 均匀频域下采样模式

Fig. 4 Three kinds of sub-sampling patterns with sampling rate of 25%. (a) Exponential distribution sub-sampling pattern; (b) radial sub-sampling pattern; (c) uniform sub-sampling pattern

表 2 不同频域下采样模式下重构图像的峰值信噪比

Table 2 Peak signal to noise ratio of reconstruction image at different sub-sampling patterns

Propagation distance d_i/mm	Exponential distribution				Radial sub-sampling				Uniform sub-sampling			
	sub-sampling rate /%				rate /%				rate /%			
	60	50	40	30	60	50	40	30	60	50	40	30
d_1	23.8728	21.9844	21.2739	21.3270	22.7679	21.3094	21.0166	20.6521	13.3494	12.5354	11.3412	12.0011
d_2	26.5269	25.5635	24.2613	23.6908	26.2823	25.0436	23.3682	22.7118	13.5647	14.2729	12.1356	11.2417
d_3	25.2103	25.2080	25.2701	25.5557	4.8710	24.7197	24.8710	25.5001	22.9119	22.1111	20.1191	18.1980

由表 2 可以看出,在不同的频域下采样模式下,随着下采样率的增加,三种下采样模式重构图像的质量不断提高,并且当下采样率相同时,指数分布变密度频域下采样模式具有更优的重构质量指标。但由于是在频域下采样操作,因此会不可避免地在信号重构时带来混叠的干扰。相比于其他的下采样模式,由于指数分布变密度频域下采样模式的非相干性,故而对重构图像的混叠干扰更弱,使重构图像的峰值信噪比更高。

4.2.4 实验 D

利用文中提出的 3DTV 模型,采用指数分布变密度频域下采样模式对 FCGH 频域进行下采样,将频域压缩重构结果与文献[19]中(TV 模型,高斯随机测量矩阵对 FCGH 的空域下采样)直接提供的压缩重构数据进行客观对比。分别取 FCGH 频域数据的 60%,50%,40%,30%对原三维复杂物体进行重构。由于采用的指数分布变密度频域下采样矩阵具有随机性,每次下采样采集的全息图频域数据并不完全相同,所以每次实验分别重复 10 次,然后取平均值以提高准确度。重建算法采用 TwIST 算法,对象的估计是根据 3DTV 稀疏约束实现迭代更新的。重构图像的质量指标用峰值信噪比进行评价,对比结果如表 3 所示。

表 3 重构图像的峰值信噪比
Table 3 Peak signal to noise ratio of reconstruction image

Propagation distance d_i /mm	3DTV model sub-sampling rate /%				TV model sub-sampling rate ^[19] /%			
	60	50	40	30	60	50	40	30
d_1	23.8728	21.9844	21.5739	21.3270	23.7074	—	21.4287	—
d_2	26.5269	25.5635	24.2613	23.6908	23.6549	—	20.6665	—
d_3	25.2103	25.2080	25.2701	25.5557	23.0181	—	20.5149	—

在文献[19]的基础上,增加下采样率为 50%和 30%时的频域压缩重建结果。由表 3 可以看出,基于本文所提出的 3DTV 模型,随着下采样率的增大,指数分布变密度频域下采样模式下重构各层聚焦图像的峰值信噪比增加,且随着下采样率降低,重建图像的质量指标下降的速率非常低,这进一步表明了本文方法的有效性,特别是其在低采样率下的重构结果远远优于文献[19]的压缩重构结果(利用高斯随机测量矩阵对全息图空域下采样)。

5 结 论

提出一种基于 3DTV 稀疏模型的复杂三维场景的非涅耳全息图频域压缩重建方法。利用全息图频域信息大都集中在低频中心区域的先验信息,引入一种概率密度函数服从指数分布的非相干变密度频域下采样模式对 FCGH 的频域进行下采样操作,再利用压缩感知重构算法对下采样后的全息图频域信息进行压缩重建。通过实验验证了该变密度频域下采样模式对复杂三维场景 FCGH 频域压缩重建的可行性,与传统的利用欠采样的高斯随机测量矩阵对全息图空域的采样模式相比,提出的方法能够在低采样率下大大提高重构图像的峰值信噪比,从而保证在低采样率下也可以有效抑制离焦像对重建图像质量的影响,进一步提高了数据的存储速率和传输速率。需要指出的是,这对于将来研究出可以进一步精确重构出对象的压缩重构算法以及加速运算算法是必不可少的。

参 考 文 献

- [1] Wei S. Introduction to holographic imaging[M]. Hefei: Anhui University Press, 2013.
韦 穗. 全息成像概论[M]. 合肥: 安徽大学出版社, 2013.
- [2] Stein A D, Wang Z, Leigh J S, Jr, *et al.* Computer-generated holograms: a simplified ray-tracing approach[J]. Computers in Physics, 1992, 6(4): 389-392.
- [3] Pan Y J. Research on the method of computational holography in 3D display of dynamic holography[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015.
潘奕捷. 动态全息三维显示中的计算全息面元方法研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
- [4] Cao X M, Sang X Z, Chen Z D, *et al.* Computer generated hologram of complex three-dimensional object based on a two-dimensional color image and the depth map[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(6): 0609002.
曹雪梅, 桑新柱, 陈志东, 等. 基于二维彩色图像和深度图的复杂三维场景的计算全息图[J]. 中国激光, 2014, 41(6): 0906002.
- [5] Gu S, Li C G. Research on the method of computer-generated hologram[J]. Modern Electronics Technique, 2015, 38(22): 91-93.
辜 苏, 李重光. 三维物体计算全息的方法研究[J]. 现代电子技术, 2015, 38(22): 91-93.
- [6] Yang G, Sun Y, Xie H. Computer-generated hologram fast transmission using compressive sensing[C]. Mathematics

- in Imaging 2016, 2016: JW4A.34.
- [7] Brady D J, Choi K, Marks D L, *et al.* Compressive holography[J]. *Optics Express*, 2009, 17(15): 13040-13049.
- [8] Choi K, Horisaki R, Hahn J, *et al.* Compressive holography of diffuse objects[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(34): H1-H10.
- [9] Rivenson Y, Stern A, Javidi B. Compressive Fresnel holography[J]. *Journal of Display Technology*, 2010, 6(10): 506-509.
- [10] Rivenson Y, Rot A, Balber S, *et al.* Recovery of partially occluded objects by applying compressive Fresnel holography[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(10): 1757-1759.
- [11] Rivenson Y, Stern A, Javidi B. Improved depth resolution by single-exposure in-line compressive holography[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(1): A223-A231.
- [12] Wu X, Yu Y, Zhou W, *et al.* 4f amplified in-line compressive holography[J]. *Optics Express*, 2014, 22(17): 19860-19872.
- [13] Weng J W, Li H, Yang C P, *et al.* Reconstruction of off-axis Fresnel hologram with compressed sensing[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2015, 42(1): 32-38.
翁嘉文, 李海, 杨初平, 等. 压缩感知重建离轴菲涅耳全息图[J]. *光电工程*, 2015, 42(1): 32-38.
- [14] Weng J W, Yang C P, Li H. Self-interference incoherent digital hologram by compressive sensing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(2): 0209001.
翁嘉文, 杨初平, 李海. 自干涉非相干数字全息图的压缩感知重建[J]. *光学学报*, 2016, 36(2): 0209001.
- [15] Weng J W, Qin Y, Yang C P, *et al.* Reconstruction of single low-coherence digital hologram by compressive sensing[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(10): 100901.
翁嘉文, 秦怡, 杨初平, 等. 单幅弱相干光数字全息图的压缩感知重建[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(10): 100901.
- [16] Endo Y, Shimobaba T, Kakue T, *et al.* GPU-accelerated compressive holography[J]. *Optics Express*, 2016, 24(8): 8437-8445.
- [17] Endo Y, Shimobaba T, Kakue T, *et al.* GPU-acceleration of compressive Fresnel holography[C]. *Digital Holography and Three-Dimensional Imaging 2016*, 2016: DW5I.7.
- [18] Liu J, Zhang G, Zhao K, *et al.* Compressive holography algorithm for the objects composed of point sources[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(3): 530-542.
- [19] Cao X, Sang X, Chen Z, *et al.* Fresnel hologram reconstruction of complex three-dimensional object based on compressive sensing[J]. *Chinese Optics Letters*, 2014, 12(8): 080901.
- [20] Wu X Y, Yu Y J, Zhou W J, *et al.* Tomographic reconstruction of lensless amplification hologram based on compressive sensing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(12): s209002.
伍小燕, 于瀛洁, 周文静, 等. 压缩传感无透镜放大全息层析重建[J]. *光学学报*, 2014, 34(12): s209002.
- [21] Kim N, Piao Y, Kwon K C, *et al.* Depth map based angular spectrum method for computer-generated hologram from real scene[C]. *Digital Holography and Three-Dimensional Imaging 2016*, 2016: JW4A.29.
- [22] Wang Z, Arce G R. Variable density compressed image sampling[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2010, 19(1): 264-270.
- [23] Di H, Zheng K, Zhang X, *et al.* Multiple-image encryption by compressive holography[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(7): 1000-1009.
- [24] Rudin L I, Osher S, Fatemi E. Nonlinear total variation based noise removal algorithms[J]. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 1992, 60(1): 259-268.
- [25] le Montagner Y, Angelini E, Olivo-Marin J C. Video reconstruction using compressed sensing measurements and 3D total variation regularization for bio-imaging applications[C]. *19th IEEE International Conference on Image Processing*, 2012: 917-920.
- [26] Bioucas-Dias J M, Figueiredo M A T. A new twist: two-step iterative shrinkage/thresholding algorithms for image restoration[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2007, 16(12): 2992-3004.