

部分遮挡三维彩色物体的压缩全息

张 成^{1,2}, 汪 东¹, 沈 川¹, 王美琴¹, 陈倩文¹, 韦 穗¹

(1. 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;

2. 安徽大学安徽省现代成像与显示技术重点实验室, 安徽合肥 230039)

摘 要: 压缩全息将压缩感知理论与全息显示技术结合在一起, 利用压缩感知理论, 可以由少量的测量数目精确地从 2D 全息图中恢复 3D 对象. 本文将压缩全息理论从单波长情形拓展到彩色物体的压缩全息, 同时研究每层图像在轴向上有较多遮挡的 3D 对象的 3DTV 压缩重建, 最后通过数值实验验证了本文方法的有效性, 并探究复杂物体的填充比例对重建质量的影响, 以及不同层之间的遮挡位置和噪声对重建质量的影响.

关键词: 压缩全息; 压缩感知; 彩色全息; 三维重建

中图分类号: O438

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2019)01-0033-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2019.01.005

Compressed Holography of 3D Color Object with Partial Occlusion

ZHANG Cheng^{1,2}, WANG Dong¹, SHEN Chuan¹, WANG Mei-qin¹, CHEN Qian-wen¹, WEI Sui¹

(1. Key Laboratory of Intelligent Computing & Signal Processing (Ministry of Education), Anhui University, Hefei, Anhui 230039, China;

2. Key Laboratory of Modern Imaging and Display Technology of Anhui Province, Anhui University, Hefei, Anhui 230039, China)

Abstract: Compressed holography combines the theory of compressed sensing with the holographic display technology. Using the theory of compressed sensing, 3D objects can be accurately restored from the 2D hologram only by a small number of measurements. In this paper, the theory of compressed sensing is extended from the single-wavelength case to the compressed holography of the color object, and the 3DTV compressed reconstruction of 3D objects with more overlap in the axial direction is studied. Finally, the validity of the method is verified by numerical experiments and the effect of the filling ratio of complex objects on the quality of reconstruction as well as the effect of the position of overlap and noise on the reconstruction quality between different layers are explored.

Key words: compressed holography; compressed sensing (CS); color holography; three-dimensional reconstruction

1 引言

数字全息是通过 CCD 记录一张强度图像, 随后通过计算机数值计算来重建原物体信息的一种全息技术^[1], 但是数字全息有一个很大的缺陷: 需要高的存储容量和带宽, 这使得数字全息的广泛应用受到了很大的限制. 压缩感知 (Compressed Sensing, CS)^[2-4] 理论于 2006 年 Candès、Donoho、Tao 等人提出, 它是在已知信号具有稀疏性或可压缩的条件下, 对信号数据进行采集、编码以及解码的新理论, 只需要对稀疏信号进行有限的测量便能达到精确的重构, 大大提高了效率, 节省了

系统资源, 突破了传统采样上信号的采样率不得低于信号带宽 2 倍的限制^[5-8].

压缩感知理论发展到今日已经得到了广泛的应用, Brady 等人在文献[9]中将压缩感知与全息术结合在一起, 将之称为压缩全息, 并扩展其应用到漫射体的全息重建上^[10]. L Martinez-León 等人提出一种带有相位照明结构的单像素数字全息技术, 其通过在液晶空间光调制器上加载一个微型结构的相位图案, 对原物体进行采样, 后续的真实实验表明了该方法的可行性以及使用相位编码的优点^[11]. 国内上海大学的伍小燕等

收稿日期: 2017-04-10; 修回日期: 2018-05-07; 责任编辑: 孙瑶

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 61501001, No. 61377006, No. 61301296, No. 61605002); 安徽省自然科学基金 (No. 1508085MF121, No. 1608085QF161); 安徽省高等学校自然科学研究 (No. KJ2015A114, No. KJ2016A029, No. KJ2017A005); 智能计算与信号处理重点实验室开放课题

人在文献[9]的基础上,将4f放大系统与压缩全息结合,给出了一种新的基于4f放大的高精度全息重建的方法,通过模拟与真实实验将此方法应用到微小多层物体上,并证明了该方法的可行性,同时对光轴上存在部分遮挡的稀疏物体进行了单波长下的全息重建^[12].安徽大学的张成等人将多波长引入到三维全息重建中,实现了三维自稀疏物体的三维彩色全息重建^[13].翁嘉文等人实现了基于LED的弱相干光数字全息图的数值重建,提出一种可抑制孪生像及相干寄生噪声的方法,该方法可应用于动态物体的观测与记录^[14].

但Brady提出的由2D全息图重建3D对象的压缩全息技术,只针对3D对象每层在轴向方向上无遮挡或遮挡较少情况下的单波长重建,而伍小燕对沿光轴轴向上有遮挡的情况进一步开展的相关工作,其遮挡的比例仍较小,且同样是在单波长情形下进行全息重建;张成等人结合此二人的工作,将单波长拓展到多波长情形下,实现了彩色三维物体全息重建,但实验对象本身仍比较稀疏,且在轴向上无任何遮挡.本文结合以上作者的特点,将轴向上遮挡的比例进一步扩大,并将单波长情形引入到多波长情形,通过数值实验对在轴向上遮挡多少的情况对彩色全息重建结果的影响进行了对比;同时探究要得到较为理想的彩色全息重建结果时3D对象每层最合适的填充比例以及在该适当的比例下3D对象每层所在的位置对重建结果的影响,最后在重建过程中添加噪声以验证实验的鲁棒性能.

2 基本理论

2.1 压缩感知

稀疏信号是指该信号可用少数个特征向量的线性组合来表示,假设存在一个长度为 N 的稀疏信号 \mathbf{x} ,则能用一组基 $\Psi^T = [\Psi_1, \Psi_2, \dots, \Psi_N]$ 的线性组合表示,即

$$\mathbf{x} = \Psi\boldsymbol{\alpha} \quad (1)$$

式中, $\boldsymbol{\alpha}$ 是 $N \times 1$ 的系数向量, Ψ 是 $N \times N$ 的稀疏矩阵, \mathbf{x} 是 $N \times 1$ 的向量.

压缩感知测量过程是将信号 \mathbf{x} 投影到一组测量矩阵 Φ 上,并得到测量值

$$\mathbf{y} = \Phi\mathbf{x} \quad (2)$$

其中, \mathbf{y} 是 $M \times 1$ 的向量, Φ 是 $M \times N$ 的矩阵.联立式(2)和式(1),有

$$\mathbf{y} = \Phi\mathbf{x} = \Phi\Psi\boldsymbol{\alpha} \quad (3)$$

式中 $\Theta = \Phi\Psi$ 是 $M \times N$ 的感知矩阵^[15].

由于测量值维数 $M \ll N$,故直接通过式(2)来求解信号 \mathbf{x} 是病态的.假设系数向量 $\boldsymbol{\alpha}$ 中的非零系数的个数为 $K(K \ll N)$ 个,为了使得可由 M 个测量值准确的恢复 K 个系数,式(3)中的感知矩阵 Θ 须满足限制等距性质(Restricted Isometry Property, RIP)^[2,3]

$$1 - \delta_s \leq \frac{\|\Theta\mathbf{x}\|_2^2}{\|\mathbf{x}\|_2^2} \leq 1 + \delta_s \quad (4)$$

式中 $\delta_s \in [0, 1]$ 为一个常数.

当满足上述性质时,CS对应的向量 $\boldsymbol{\alpha}$ 即可通过下式来求解

$$\min_{\boldsymbol{\alpha}} \|\boldsymbol{\alpha}\|_{l_0} \quad \text{s. t. } \mathbf{y} = \Phi\Psi\boldsymbol{\alpha} \quad (5)$$

由于式(5)的求解是个NP-hard问题,而 l_1 最小范数在一定条件下和 l_0 最小范数具有等价性,故式(5)可转化为 l_1 最小范数下的最优化问题

$$\min_{\boldsymbol{\alpha}} \|\boldsymbol{\alpha}\|_{l_1} \quad \text{s. t. } \mathbf{y} = \Phi\Psi\boldsymbol{\alpha} \quad (6)$$

2.2 彩色压缩全息

如图1所示,一个Gabor全息图是由一个平面波 A 与一个具有散射强度 $\eta(x', y', z')$ 的3D物体干涉形成,在2D检测器阵列上可记录其干涉后的振幅强度

$$\begin{aligned} I(x, y) &= |A + E(x, y)|^2 \\ &= |A|^2 + |E(x, y)|^2 + A^*E(x, y) + AE^*(x, y) \end{aligned} \quad (7)$$

这里 $E(x, y)$ 是3D物体表面的散射场, $|A|^2$ 是一个常量,可通过消除来自 $I(x, y)$ 傅里叶变换后的直流项来消除 $|A|^2$ 的影响,在此,可以不失一般性的假设 A 为1,结合文献[16]的简化处理,那么式(7)可写为

$$I(x, y) \approx 2\text{Re}\{E(x, y)\} + e(x, y) \quad (8)$$

如果忽略 $|E(x, y)|^2$ 的非线性并将 $e(x, y)$ 视作模型误差,那么式(8)可看成是物体散射密度和测量数据的一个线性映射.这里,散射场 $E(x, y)$ 经过Born逼近^[17]为

$$\begin{aligned} E(x, y) &= \iiint dx' dy' dz' \eta(x', y', z') \\ &\quad \times h(x - x', y - y', z - z') \end{aligned} \quad (9)$$

然后离散化^[8]得

$$\begin{aligned} E_{n_1, n_2} &= F_{2D}^{-1} \left\{ \sum_l \hat{\eta}_{m, m'} \exp(ik_{(R, G, B)} l \Delta_z) \right. \\ &\quad \left. \times \exp(il \Delta_z \sqrt{k_{(R, G, B)}^2 - m_1^2 \Delta_k^2 - m_2^2 \Delta_k^2}) \right\} \end{aligned} \quad (10)$$

这里 $\hat{\eta}$ 是 η 的傅里叶变换, $k_{(R, G, B)} = 2\pi/\lambda_{(R, G, B)}$,是各色光的波数.

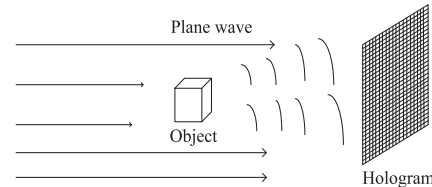


图1 Gabor全息几何示意图

定义 $f_{(l-1)N_x + (m_1-1)N_y + m_1} = \hat{\eta}_{m_1, m_1'}$, $\bar{g}_{(n_2-1)N_y + n_2} = E_{n_1, n_2}$, 这里 N_x 和 N_y 分别代表 x 和 y 方向上的检测器像素数目.则式(10)可写为

$$\bar{\mathbf{g}} = F_{2D}^{-1} Q B \mathbf{f} \quad (11)$$

其中 $Q = [P_1 P_2 \cdots P_N]$, 且

$$[P_i]_{m_1 m_2} = \exp(ik_{(R,G,B)} l \Delta_z) \times \exp(i l \Delta_z \sqrt{k_{(R,G,B)}^2 - m_1^2 \Delta_k^2 - m_2^2 \Delta_k^2}) \quad (12)$$

其表示矩阵 P_i 第 m_1 行第 m_2 列的元素值. $B = \text{blkdiag}[F_{2D}, F_{2D}, \cdots, F_{2D}]$, blkdiag 表示块对角矩阵, F_{2D} 表示 2D 离散傅立叶变换, 其大小为 $(N_x N_y) \times (N_x N_y)$.

综合上述, Gabor 全息测量可写作

$$I = 2\text{Re}\{\bar{g}\} = 2\text{Re}\{Hf\} + e + n \quad (13)$$

其中 I 为直流分量被移除后的 Gabor 全息图, $H_{ij} = [F_{2D}^{-1} QB]_{ij}$, e 和 n 分别表示矢量化的 $|E(x, y)|^2$ 和附加的噪声.

式(13)的前向测量模型通过解压缩干涉并在三维总变分(3D Total Variation, 3DTV)上施加一个稀疏约束^[18]可以转化为如下的问题

$$\hat{f} = \arg \min_f \|f\|_{3DTV} \quad \text{s. t. } I = Hf \quad (14)$$

这里 $\|f\|_{3DTV}$ 由下式定义

$$\|f\|_{3DTV} = \sum_p \sqrt{(D_h f_k)(p)^2 + (D_v f_k)(p)^2 + (D_t f_k)(p)^2} \quad (15)$$

其中 f 表示 3D 物体, p 遍历 f 每一帧上的每一个像素点, D_h 、 D_v 和 D_t 分别代表水平、垂直和时间方向上的离散微分算符, 最后使用两步迭代收缩/阈值算法(Two-step Iterative Shrinkage/Thresholding, TwIST)来求解此优化问题^[19].

3 数值实验

本节针对部分遮挡物体的三维彩色物体的全息压缩重建, 给出相应的模拟实验. 本节共设计了五组实验, 用于测试本文方法的有效性和本文方法的性能. 第一组实验测试由遮挡较少的英文字母组成的三维彩色物体的层析重建, 第二组实验中的测试物体采用的是标准测试二维图像构成的遮挡较多的更复杂的三维场景. 第三组实验用于测试三维物体的遮挡比例对重建结果的影响. 第四组实验测试构成三维物体的每层物体中心位置的不同对重建结果的影响. 第五组实验用于测试本文方法的鲁棒性, 即添加噪声对重建结果的影响.

3.1 自稀疏情形

本实验选取的轴向遮挡较少的 3D 对象为由 4 个字母所组成的 5 层图像(大小为 180×180), 这里每层的图像设置为长宽相等. 其轴向上每层切片包含的图像如图 2(a) 所示, 后四个平面依次包含 'A'、'H'、'T'、'V' 四个字母, 位置置于各平面中央. 从左至右依次使用波长分别为 633nm、532nm、473nm、633nm、532nm 的平面波作为照明光源, 这里光场振幅设为 1, 2D 检测器阵列像素间距为 $4.65 \mu\text{m}$, 3D 对象每层间距为

$2000 \mu\text{m}$, 迭代次数设置为 500 次.

由图 2 可以看出, 3D 对象每层中的图像的重建质量比较高, 能清晰地辨认出原图像中的内容, 对于每个图像中细节部分的重建也有着不错的结果. 其原因是对于比较简单的三维物体, 由于其各平面的图像在轴向上遮挡较少, 每层中的图像在 TV 模下的模值较小, 得到的重建结果比较理想.

表 1 中给出了对于轴向遮挡较少的物体, 本文所使用的 3DTV 稀疏模型与 Brady 所用的 TV 稀疏模型的性能对比. 由于本实验原 3D 物体的第一层并未放置图像, 故这里仅分别对第 2、3、4、5 层进行峰值信噪比和归一化相关系数值进行对比. 由表 1 可以看出, 对于本身比较稀疏的物体, 其重建后的 PSNR 值相近, 这是由于实验 3.1 所用的三维物体沿光轴轴向上的遮挡比例不多, 不同平面上的图像中非零值较少, 并不能凸显本文所使用的 3DTV 稀疏模型的优势.

表 1 实验 3.1 在不同稀疏模型下的重建性能对比

稀疏模型 \ 层序		2	3	4	5
		3DTV	PSNR 68.4578	70.1448	73.6639
	NC	0.8613	0.9808	0.9616	0.9255
TV	PSNR	68.3482	69.9056	73.4180	74.5074
	NC	0.8574	0.9869	0.9687	0.9307

3.2 多遮挡情形

由于实验 3.1 所选取的实验对象是自稀疏的, 其每一层的图像在轴向上遮挡较少, 故设置本组实验, 探究当 3D 对象每一层图像在轴向上有较多遮挡时的重建结果如何. 本实验所选取的轴向遮挡较多的 3D 对象由 5 层图像(大小为 180×180) 所组成, 置于 3D 对象各平面的中央. 其轴向上每层切片图像如图 3(a) 所示, 其中第一个平面没有放置任何图像, 后四个平面依次为图像处理中常用的 lena、test、girl 以及 goldhill 图. 这里实验选取的实验照明光源、设置的光场、检测器阵列的参数以及 3D 对象每层的间距和迭代次数与实验 3.1 相同.

由图 3 可以看出, 对于 3D 对象每层图像在轴向上较多的情形下进行彩色全息重建时, 其重建的结果仍能比较清晰地辨认出原物体的内容, 但相对于实验 3.1 的情形, 其重建质量较低, 对高频部分的重建不太理想. 由于这里 3D 对象每层中的图像在 TV 模下的模值较大, 导致了重建质量的下降.

表 2 中给出了对于轴向遮挡较多的物体在彩色压缩重建后的性能对比. 由表 2 可以看出, 本文所使用的 3DTV 稀疏模型相比于 TV 稀疏模型下重建的 PSNR 值和 NC 值明显要高.

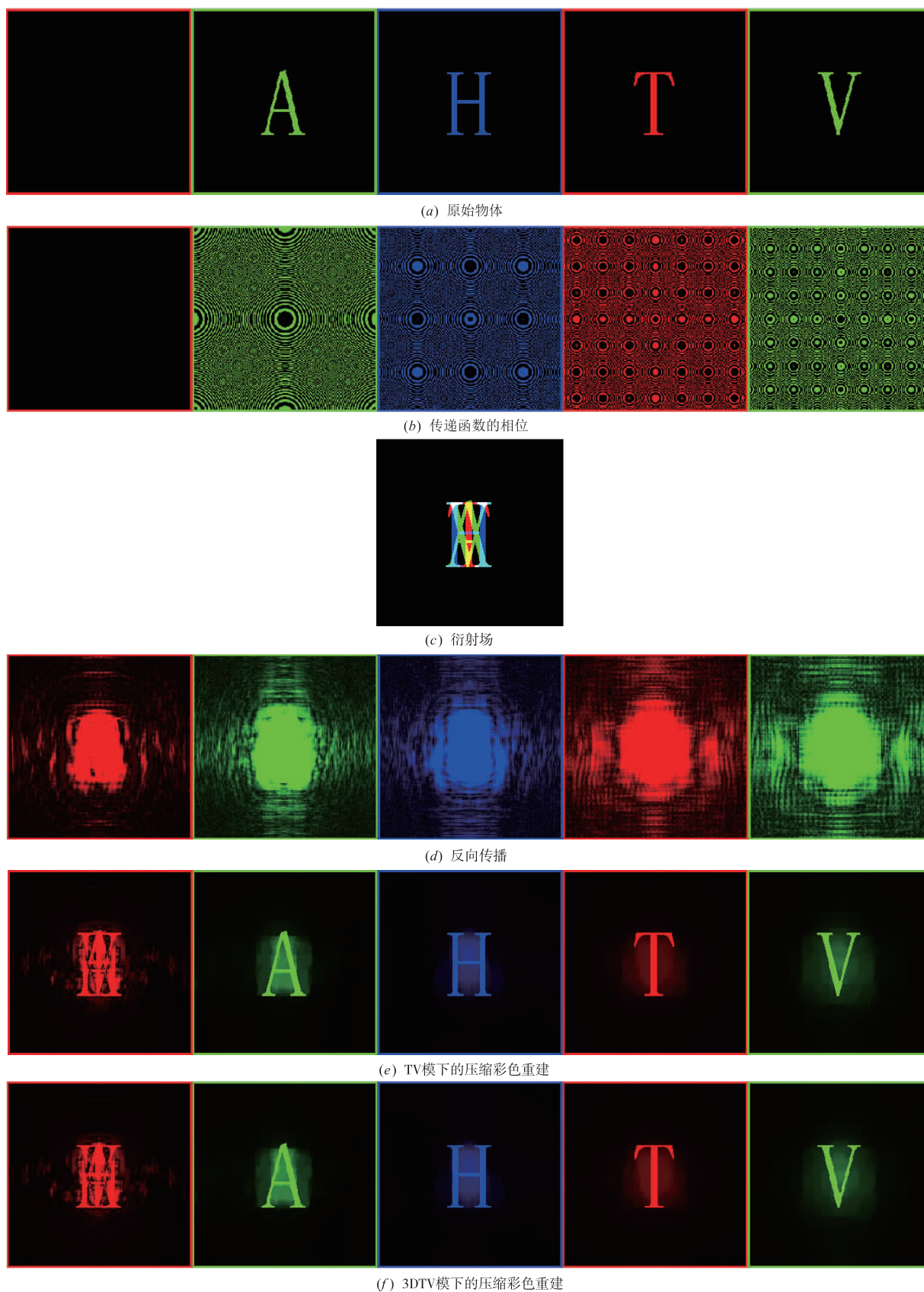
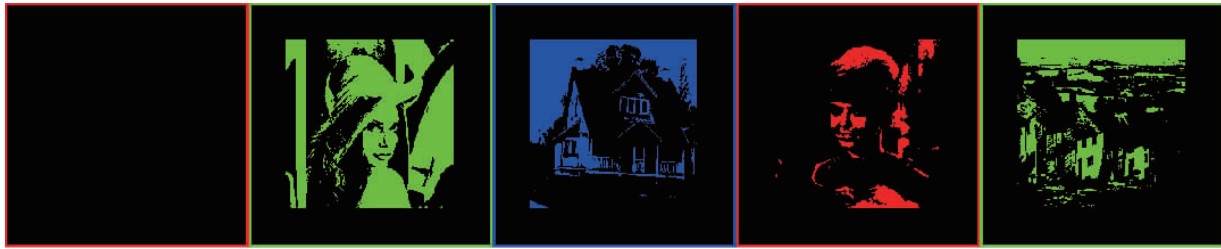
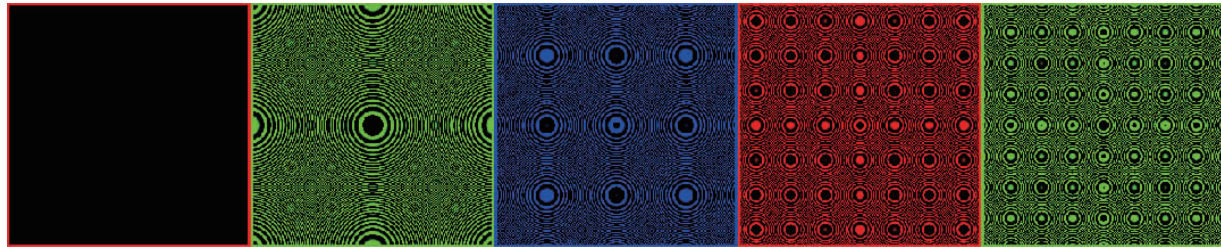


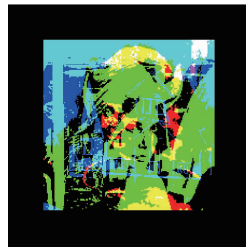
图2 沿光轴方向遮挡较少的彩色全息成像



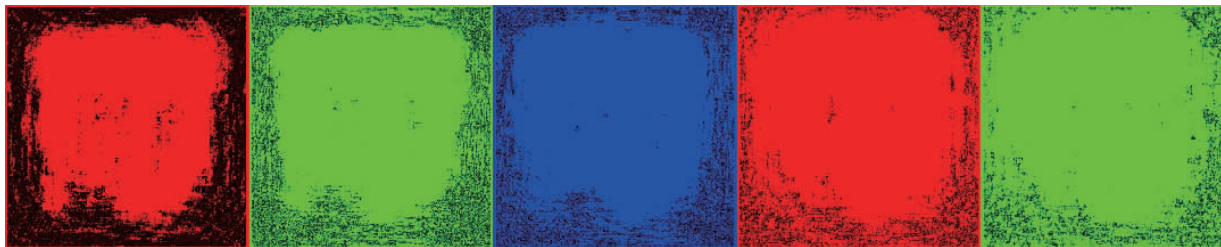
(a) 原始物体



(b) 传递函数的相位



(c) 衍射场



(d) 反向传播



(e) TV模式下的压缩彩色重建



(f) 3DTV模式下的压缩彩色重建

图3 沿光轴方向遮挡较多的彩色全息成像

表 2 实验 3.2 在不同稀疏模型下的重建性能对比

层序		2	3	4	5
稀疏模型	PSNR	58.0691	56.2110	56.3311	56.5793
	NC	0.9604	0.9474	0.8502	0.9520
3DTV	PSNR	54.9203	54.7338	54.0221	55.3189
	NC	0.8230	0.7571	0.8497	0.8021

3.3 不同填充比例下的彩色全息重建

由于实验 3.2 的重建质量相较于实验 3.1 要差一些,考虑实验 3.2 所选取的每层图像中有意义的部分占整层的比例较大,设计本实验探究 3D 对象每层图像所占整层图像的比例对重建结果的影响. 本实验采用实验 3.2 所使用的四幅图像,每幅图像的长与宽相等,每层中的图像的大小由 40×40 递增至 220×220 ,每次图像的长和宽均增加 10 个像素. 这里照明选用的光源以及各参数的设置与上述实验相同,实验结果如图 4 所示.

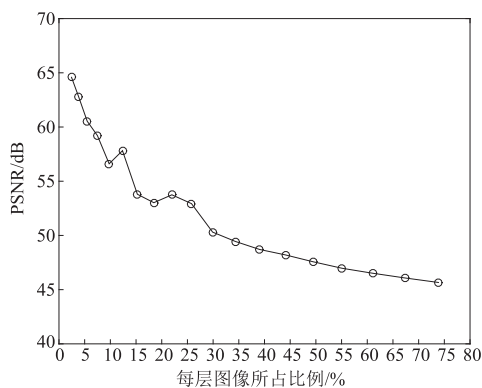


图4 不同填充比例下重建的峰值信噪比

由图 4 可看出,当 3D 对象每层所占有的比例逐渐增加时,其重建后的峰值信噪比整体趋势呈减小趋势,即重建质量呈下降状态,其原因是因为在同样的测量数目的条件下,由于 TV 模值的增大,导致三维物体重建质量的下降. 图中有个别填充比例下的重建峰值信噪比突增,考虑是实验次数较少,并不能完全精确的反映重建的峰值信噪比的趋势,但总的来说,3D 对象每层中的图像所占的比例越大,将导致重建质量的降低.

3.4 不同位置下的彩色全息重建

前面所做的实验中,3D 对象每层的图像都是居于每层切片的中央,考虑每层中的图像在其他位置下会对重建结果产生的影响,设计了本实验. 本实验设计每层中的图像大小为 168×168 ,其位置随机的位于每层大小为 256×256 的平面中,保证了每层中的图像在轴向上总是有一部分是遮挡的. 表中的偏移区间指的是每层中的图像偏离轴心的范围. 通过在随机位置下的重建峰值信噪比,探究位置对重建结果的影响,实验结果如表 3 所示.

表 3 不同偏移区间下的重建峰值信噪比

偏移区间(pixel)	0	0-22	22-44
PSNR(dB)	48.66	48.89	48.86

由表 3 可看出,当 3D 对象每层的图像偏离轴心的偏移量增加时,其重建时的峰值信噪比变化甚微. 考虑其虽然偏离轴心的距离不同,但是每层的图像在该层所占有的比例是一定的,故在重建的过程中,位置的不同对重建结果的影响并不大.

3.5 噪声下的彩色全息重建

实验 3.3 已经验证了当 3D 对象每层的图像所占的比例越大时,彩色全息重建的质量越差,在所选取的图像大小为 40×40 时重建信噪比最大,质量最高. 本实验选取每层的图像大小为 40×40 ,通过添加高斯白噪声探究该填充比例下的鲁棒性. 实验装置和参数保持不变,实验结果如图 5 所示.

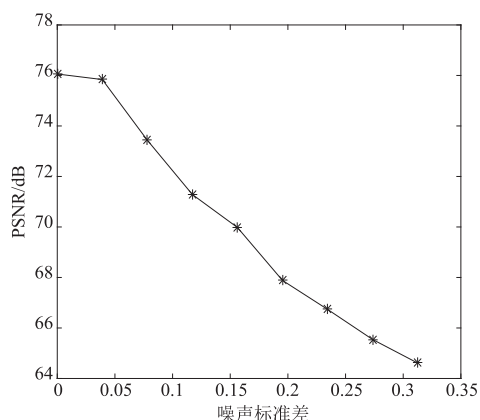


图5 高斯白噪声下的彩色全息重建

由图 5 可以看出,在噪声标准差约为 $0 \sim 0.05$ 的区间内时,本文提出的彩色全息重建方法在高斯白噪声的干扰下,随着标准差的增加,其重建的信噪比下降缓慢,对高斯白噪声的抗干扰能力较强,而在标准差大于 0.05 后,信噪比下降比较明显,鲁棒性较弱.

4 结论

本文提出一种新的彩色全息重建方法,将单波长引入到彩色情形,探究了 3D 对象每层图像在轴向上部分与完全的遮挡对彩色全息重建结果的影响,探究了 3D 对象每层图像的大小以及不同层之间的遮挡位置和不同的噪声类别对本文提出的彩色全息重建结果的影响,对数字全息领域的研究与发展具有重要的促进意义.

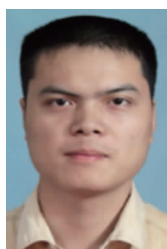
参考文献

[1] 陈竹,姜宏振,刘旭,等. 数字全息术用于光学元件表面缺陷形貌测量[J]. 光学精密工程,2017,25(3):576-583.

CHEN Zhu, JIANG Hong-zhen, LIU Xu, et al. Measure-

- ment of surface defects of optical elements using digital holography[J]. Editorial Office of Optics and Precision Engineering, 2017, 25(3): 576 – 583. (in Chinese)
- [2] CANDES E J, ROMBERG J K, TAO T. Stable signal recovery from incomplete and inaccurate measurements[J]. Communications on Pure and Applied Mathematics, 2006, 59(8): 1207 – 1223.
- [3] CANDES E J, TAO T. Near-optimal signal recovery from random projections: Universal encoding strategies [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(12): 5406 – 5425.
- [4] DONOHO D L. Compressed sensing [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(4): 1289 – 1306.
- [5] 田文彪, 芮国胜, 康健, 等. 基于 Monte Carlo 采样的压缩感知弱匹配去噪重构[J]. 电子学报, 2015, 43(9): 1732 – 1737. TIAN Wen-biao, RUI Guo-sheng, KANG Jian, et al. Monte carlo matching pursuit denoising inversion for compressed sensing[J]. Acta Electronica Sinica, 2015, 43(9): 1732 – 1737. (in Chinese)
- [6] 沈燕飞, 朱珍民, 张勇东, 等. 基于秩极小化的压缩感知图像恢复算法[J]. 电子学报, 2016, 44(3): 572 – 579. SHEN Yan-fei, ZHU Zhen-min, ZHANG Yong-dong, et al. Compressed sensing image reconstruction algorithm based on rank minimization[J]. Acta Electronica Sinica, 2016, 44(3): 572 – 579. (in Chinese)
- [7] 练秋生, 韩敏, 石保顺, 等. 融合解析模型和综合模型的压缩感知算法[J]. 电子学报, 2016, 44(3): 613 – 619. LIAN Qiu-sheng, HAN Min, SHI Bao-shun, et al. Compressed sensing algorithm fused the cospase analysis model and the synthesis sparse model[J]. Acta Electronica Sinica, 2016, 44(3): 613 – 619. (in Chinese)
- [8] MARTÍNEZ-LEÓN L, CLEMENTE P, MORI Y, et al. Single-pixel digital holography with phase-encoded illumination[J]. Optics Express, 2017, 25(5): 4975 – 4984.
- [9] BRADY D J, CHOI K, MARKS D L, et al. Compressive holography[J]. Optics Express, 2009, 17(15): 13040 – 13049.
- [10] CHOI K, HORISAKI R, HAHN J, et al. Compressive holography of diffuse objects[J]. Applied Optics, 2010, 49(34): H1 – H10.
- [11] MARTÍNEZ-LEÓN L, CLEMENTE P, MORI Y, et al. Single-pixel digital holography with phase-encoded illumination[J]. Optics Express, 2017, 25(5): 4975 – 4984.
- [12] 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(B12): 117 – 124. WU Xiaoyan, YU Yingjie, ZHOU Wenjing, et al. Tomographic reconstruction of lensless amplification hologram based on compressive sensing [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(B12): 117 – 124. (in Chinese)
- [13] 张成, 沈川, 程鸿, 等. 彩色全息压缩重构[J]. 自动化学报, 2015, 41(2): 419 – 428. ZHANG Cheng, SHEN Chuan, CHENG Hong, et al. Compressed reconstruction of color holography[J]. Acta Automatica Sinica, 2015, 41(2): 419 – 428. (in Chinese)
- [14] 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): 110 – 115. WENG Jiawen, QIN Yi, YANG Chuping, et al. Reconstruction of single low-coherence digital hologram by compressive sensing [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(10): 110 – 115. (in Chinese)
- [15] 张立峰, 刘昭麟, 田沛. 基于压缩感知的电容层析成像图像重建算法[J]. 电子学报, 2017, 45(2): 353 – 358. ZHANG Li-feng, LIU Zhao-lin, TIAN Pei. Image reconstruction algorithm for electrical capacitance tomography based on compressed sensing [J]. Acta Electronica Sinica, 2017, 45(2): 353 – 358. (in Chinese)
- [16] GABOR D. A new microscopic principle [J]. Nature, 1948, 161(4098): 777 – 778.
- [17] GOODMAN J W. Statistical Optics [M]. US: John Wiley & Sons, 2015.
- [18] RUDIN L I, OSHER S, FATEMI E. Nonlinear total variation based noise removal algorithms [J]. Physica D: Nonlinear Phenomena, 1992, 60(1 – 4): 259 – 268.
- [19] BLOUCAS-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.

作者简介



张 成 男, 1984 年 10 月出生, 安徽庐江人. 分别于 2006 年、2009 年和 2012 年获得安徽大学学士学位、硕士学位以及电子信息工程学院博士学位. 现为安徽大学电子信息工程学院副教授, 主要从事压缩感知, 矩阵填充, 光学成像和相位恢复等研究工作.

E-mail: question1996@163.com



汪 东 男, 1993 年 11 月出生, 安徽肥西人. 2016 年毕业于淮北师范大学信息学院电子信息系, 2016 年进入安徽大学电子信息工程学院, 现为硕士研究生, 主要从事压缩全息和三维成像等有关研究.

E-mail: wdigdn1993@163.com

沈 川 男, 1986 年出生. 安徽舒城人. 分别于 2009 年、2012 年、2015 年获得安徽大学安徽大学电子信息工程学院学士学位、电子信息工程学院硕士学位以及电子信息工程学院博士学位. 现为安徽大学电子信息工程学院讲师, 主要从事全息显示等研究工作.