

光场衍射在压缩感知鬼成像中的研究

陈 熠, 樊 祥, 程玉宝, 程正东, 梁振宇
(脉冲功率技术国家重点实验室 电子工程学院, 安徽 合肥 230037)

摘 要:基于压缩感知的鬼成像由于采样次数少,在近些年取得重大的发展。利用数字微反射镜器件(DMD)预置光场实现单臂成像,大大推进鬼成像向实际应用发展,但也存在不少问题,比如传播过程中的光场分布变化。为了解决这个问题,首先分析光场的传播过程,透镜尺寸的限制使得光场衍射影响较大,光斑的叠加导致实际光场变得模糊偏离了预置值。计算衍射受限系统的光强度扩散函数,修正预置光场,修正光场作为观测矩阵仍然满足准确重构的互相关性条件。实验结果表明,修正的光场较好地模拟实际光场,其构成的观测矩阵用于成像,重建图像的质量更高。同样,在实际应用领域,利用光强扩散函数修正预置光场意义重大。

关键词:压缩感知;鬼成像;衍射效应;光强扩散函数;互相关性

中图分类号:O438 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2016.11.018

Research of diffraction effect in compressive sensing ghost imaging

CHEN Yi, FAN Xiang, CHENG Yu-bao, CHENG Zheng-dong, LIANG Zhen-yu
(State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

Abstract:Compressive sensing ghost imaging has made great progress in recent years because it has the characteristics of less number of samples. Aiming at optical field distribution change in ghost imaging, the propagation process of light field was analyzed. The size of the lens makes the diffraction effect more obvious. The facula superposition makes actual light field become fuzzy and deviate from the preset value. The light intensity spread function of the diffraction limited system was calculated and the preset light field was revised. However, the revised light field acting as observation matrix can still be reconstructed under the condition of mutual coherence. Experimental results indicate that the revised light field is similar to actual light field and observation matrix can reconstruct high-grade picture. So it is significant to revise preset light field by using light intensity spread function.

Key words:compressive sensing;ghost imaging;diffraction effect;intensity spread function;mutual coherence

1 引 言

鬼成像(Ghost Imaging),又称关联成像、量子成像,是一种不同于传统成像方式的新型成像技术,是近年量子光学领域受人关注的热点之一^[1],在医学成像、雷达探测、遥感技术和图像传感应用日益增多^[2-3]。但是,现阶段的鬼成像方案要想提高成像

质量,就必须大量采样,如何更高效地处理数据并最大限度地节省存储和传输成本是一大难题。因此,人们将压缩感知理论引入鬼成像,以提高成像速度^[4]。在目前的压缩感知鬼成像方案中,多采用激光透过旋转的毛玻璃的方法产生赝热光^[5],这种方法可是也存在不少的问题,如:(1)激光产生的散射

基金项目:国家自然科学基金(No. 61271376);安徽省自然科学基金(No. 1208085MF114)资助。

作者简介:陈 熠(1992-),男,硕士研究生,主要从事压缩感知鬼成像方面的工作。E-mail:lishuichenyi@sina.com

收稿日期:2016-02-14;**修订日期:**2016-03-23

斑光场随机分布,无法进行准确的控制,也不能实现单臂的鬼成像;(2)旋转的毛玻璃产生的赝热光场数量有限,不适用于采样次数较多的情况^[6]。

目前对基于数字微反射镜器件(Digital micromirror device, DMD)的压缩感知鬼成像的研究,多数停留在对成像方案的设计优化^[7]。在实际中还应考虑到光场传播中的各类影响因素,特别是成像系统衍射极限的限制,使得实际成像的光场与预置光场存在不小的偏差。实验采用计算机控制DMD^[8],产生特定的光场,实现单臂成像,提高压缩感知鬼成像的成像质量和实际应用效果。通过计算光强度扩散函数,修正预置光场,结合实验验证成像效果,最后提出可以将这种方法推广到更复杂的压缩感知鬼成像应用中。

2 基于DMD的压缩感知鬼成像原理

基于DMD的压缩感知鬼成像原理如图1所示,光场入射到数字微反射镜器件(DMD)表面,调制后的光场经过成像投影透镜照射物体,当光透过该物体后用光学元件将光束汇聚在一点,使用一个桶状光强探测器记录光路的透射总光强。该方案不再需要参考光路记录光场空间分布强度,而是用计算机控制DMD的反射角度产生预置的照明光场,通过将信号光路的测量值与照明光场做相关运算,可以获得透射物体的图像。

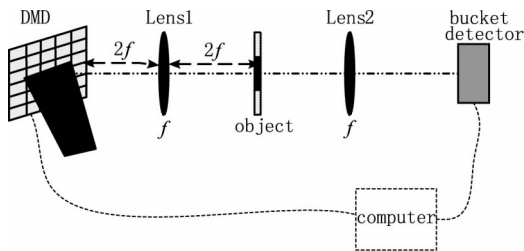


图1 基于DMD的压缩感知鬼成像

Fig.1 Compressive sensing ghost imaging based on DMD

压缩感知理论(CS)^[9]是以远低于香农-奈奎斯特理论的采样次数实现对信号的重构。鬼成像的信息获取机理与压缩感知图像信息获取方式在本质上是相通的,因而将二者结合起来可以极大地提高成像速度与成像质量。鬼成像公式就可以转化为求解最小 L_1 范数下的最优化问题。设图像 g 的稀疏变换矩阵为 Ψ ,则上述问题转换为:

$$G_{CS} = \arg \min \|\Psi g\|_1 \quad (1)$$

$$\text{s. t. } \|(\Phi \Psi')(\Psi g) - y\|_2 < \varepsilon$$

求出 Ψg 的最优解,其中 $G_{CS} = \Psi g$ 为稀疏变换的系数,再通过逆变换得到图像 $G'_{CS} = \Psi' G_{CS}$ 。与普

通的热光源鬼成像相比,基于DMD的压缩感知鬼成像系统可以实现单臂成像,贴近实际应用,成像速度更快。

3 衍射效应对观测矩阵的影响

3.1 光场强度扩散

在实际的成像试验中,预置光场的传播不是简单的无衰减的直线传播,特别是成像透镜分辨率受瑞利衍射极限限制,照亮物体的照明光场与DMD预置的光场并不相同,即测量矩阵发生变化,且成像的距离越长,成像系统越复杂,这种影响越明显。因此我们引入光强度扩散函数 $h_i(x_i, y_i)$,消除衍射的影响。光场的传播过程如图2所示。

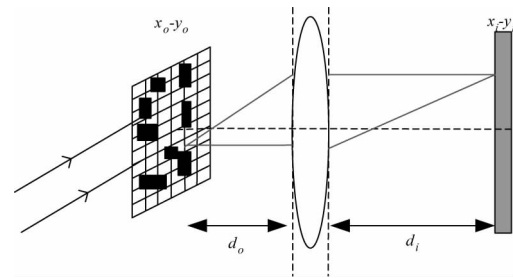


图2 光场的传播过程

Fig.2 The propagation of light field

预置光场 $S(x, y)$ 的任意一点发出的单位脉冲可以记为 $\delta(x_0, y_0)$, DMD到透镜的距离记为 d_0 , 透镜到物体的距离记为 d_i , 透镜焦距为 f , 孔径函数为 $P(x, y)$, 根据菲涅尔衍射公式, 单位脉冲 $\delta(x_0, y_0)$ 在物体上的复振幅分布即为点扩散函数:

$$h(x_i, y_i) = \frac{1}{\lambda^2 d_0 d_i} \iint P(x, y) \times \exp\left\{-j \frac{2\pi}{\lambda d_i} [(x_i - \tilde{x}_0)x + (y_i - \tilde{y}_0)y]\right\} dx dy \quad (2)$$

其中, $\tilde{x}_0 = Mx_0$, $\tilde{y}_0 = My_0$, $M = -d_i/d_0$ 为透镜的横向放大率。

设直径为 D 的透镜, 瞳函数为:

$$P(x, y) = \text{circ}\left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{D/2}\right) \quad (3)$$

在相干光场的照明下的点扩散函数可以表示为:

$$\tilde{h}(x, y) = \text{FFT}[P(x, y)] \quad (4)$$

化简式(4), 可得:

$$\begin{aligned} \tilde{h}(x, y) &= \text{FFT}[P(x, y)] \\ &= 2\pi \int_0^d r J_0(2\pi pr) dr \\ &= \pi d^2 \frac{J_1(2\pi dp)}{2\pi dp} \end{aligned} \quad (5)$$

其中, $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$, d 为透镜半径。由于卤素灯为非相干光, 实际光场受强度扩散函数 $h_l(x_i, y_i)$ 的影响, 宏观上是点物产生的像斑叠加的强度分布, 则:

$$h_l(x_i, y_i) = |\tilde{h}(x_i, y_i)|^2 \quad (6)$$

实际的测量光场 $Y(x_i, y_i)$ 就为:

$$Y(x_i, y_i) = S(x_i, y_i) \otimes h_l(x_i, y_i) \quad (7)$$

3.2 观测矩阵的性质

观测矩阵在信号压缩投影和重构过程中起着重要的作用, 好的观测矩阵能够在投影测量时保持原始信号的重要信息, 并可结合测量值准确重构出原始信号^[10]。在 CS 理论中, 高斯随机矩阵、贝努利矩阵和部分哈马达矩阵^[11]等都被证明可以用于压缩感知重构, 但是对于鬼成像中由于衍射效应产生变形的观测光场并未深入研究。

观测矩阵优劣通常用限等距 (RIP) 性质^[12]评价: 观测矩阵 Φ 的 RIP 参数 δ_k 为满足下式的最小值 δ :

$$(1 - \delta) \|x\|_2^2 \leq \|\Phi x\|_2^2 \leq (1 + \delta) \|x\|_2^2 \quad (8)$$

其中, x 为 K 稀疏信号。RIP 性质的计算十分复杂, 直接用来判定观测矩阵的好坏很难, 以其为准则设计观测矩阵也不现实, 因此利用矩阵的互相干性来弱化 RIP^[13], 评价重构概率备受关注。

矩阵 A 的互相干性 $\mu(A)$ 是各列之间内积最大绝对值归一化:

$$\mu(A) = \max_{1 \leq i, j \leq n, i \neq j} \frac{|a_i^T a_j|}{\|a_i\|_2 \cdot \|a_j\|_2} \quad (9)$$

其中, a_i 表示矩阵 A 的第 i 列。如果观测矩阵 A 是正交矩阵, 则 μ 的互相干值为 0, 从文献中^[8]可以知道, 矩阵的列相干度越高, 图像的恢复精度越差。

4 实验与仿真

4.1 实验方案

实验所需要的实验器材为: 150 W 的卤素灯、投影透镜、收集透镜、一个 DMD 芯片、透射型待测物体、CCD 探测器和桶探测器。通过计算机控制 DMD 器件, 使之产生符合贝努利矩阵分布的光场, 空间强度的涨落在 0 与 1 之间变动。预置光场的投影透镜将 DMD 反射的光场成像到物体表面。收集透镜将透过物体的光汇聚到桶探测器内, 桶探测器探测的值为不断涨落的总光强值。

首先设置 500 frame 的 DMD 控制信号, 通过 DMD 的反射形成光强周期涨落的光场, 每一个 frame 就表示对物体的一次观测。通过 CS 理论, 从桶探测器的探测值和预置的观测矩阵就可以求解最

小 l_1 范数的凸优化问题, 利用 GPSR 算法进而重构出图像。将物体取下, 换上 CCD 探测器, 再次用预置的光场照射, 用 CCD 记录的周期涨落的光场作为观测矩阵与桶探测器的探测值重构图像。

4.2 观测光场的互相干性

由于客观条件限制, 实验中所采用的透镜尺寸有限, 衍射效应对光场的影响较大。图 3 反映的是以 DMD 表面为出射屏, 直径为 6 cm 的成像投影透镜为光瞳, 物体表面为接收屏的光学系统的强度扩散函数。透镜尺寸的限制使得光场传播不再是点到点的映射, 接受屏上形成的是一个光斑, 总的光场也是无数个光场叠加的结果。

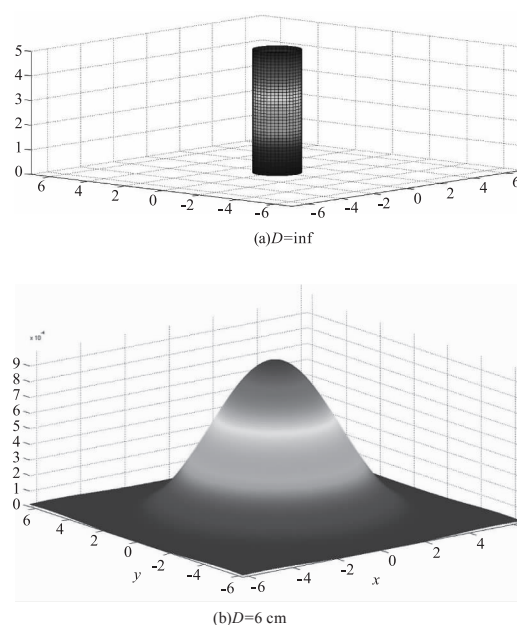


图 3 强度扩散函数

Fig. 3 Intensity spread function

图 4(a) 是由计算机控制的 DMD 器件表面的出射光场, 4(b) 是 CCD 探测器探测的物体表面的实际光场, 实际的光场分布更加均匀, 近似符合贝努利分布, 4(c) 是由强度扩散函数计算得到的光场, 与实际光场相比峰值信噪比为 69.8 dB, 可见在该系统中通过强度扩散函数修正光场准确率较高。

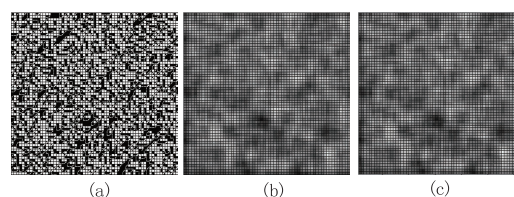


图 4 观测光场

Fig. 4 Light field

文献^[14]指出高斯随机矩阵可以用于压缩感

知的观测矩阵,其列相干性在 0.7 左右,以高斯随机矩阵为标准,当列相干性在 0.7 左右时,认为观测矩阵可以实现图像重构。图 5 是对不同探测次数时的观测矩阵的列相干性统计,可见真实光场,修正光场和实际的光场的列与列之间的互相干性 $\mu(A)$ 之间的差别并不大,当测量次数达到 500 次时,都近似满足 RIP 性质,可以用于压缩感知的算法实现图像重构。

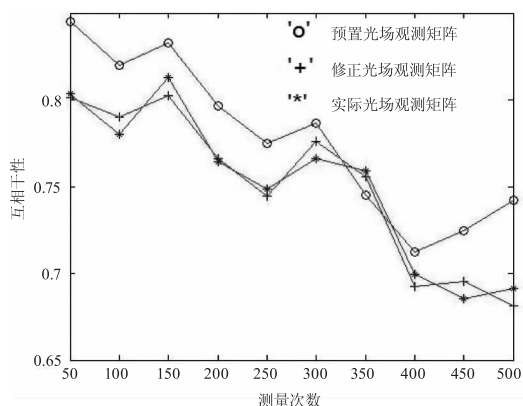


图 5 观测矩阵的互相干性

Fig. 5 Mutual coherence of observation matrix

4.3 成像结果

由于实际过程中的光场尺寸有限,为了保证成像的清晰,对 $64\text{pixel} \times 64\text{pixel}$ 的 'CS' 透射目标进行重构,测量次数为 500 次,测量结果如图 6 所示。

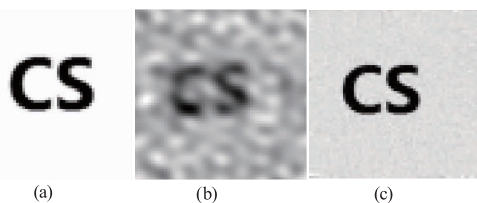


图 6 重构图像

Fig. 6 reconstructed image

图 6(a) 为原始图像,图 6(b) 是利用预置的 0 ~ 1 分布的贝努利光场作为观测矩阵重构的图像,图像噪声较大,重构效果不好,原因是贝努利光场不是真实的观测矩阵,不可能实现高质量成像。图 6(c) 是将修正的衍射后光场作为观测矩阵重构的图像,表 1 反映了用实际的衍射光场作为观测矩阵,重构图像的峰值信噪比 PSNR 为 38.7 dB,约为前者的四倍,引入衍射效应带来的强度扩散很好地提高了鬼成像的重构质量。可见,在基于 DMD 器件预置光场的压缩感知鬼成像实验中,光路的传播过程必须考虑成像距离、大气湍流和光阑衍射等诸多干扰,这些改变了原来光场的性质,真实观测矩阵的理论性质也随之改变。考虑这些因素,一定程度上可以消

除影响,提高重构图像的成像质量与清晰度。

表 1 不同观测矩阵重构图像的质量

Tab. 1 The quality of reconstructed image based on different observation matrix

观测光场	MSE	PSNR/dB
预置光场	0.0147	9.3
修正光场	0.0010	38.7

5 结论

压缩感知鬼成像方案因为计算快速,重构效果好,在今后会是研究的热点,对鬼成像朝着应用发展有着重大的意义。文章实现了基于压缩感知的鬼成像,使用 DCT 变换基作为图像物体的稀疏基,通过 DMD 器件产生 0 ~ 1 分布的贝努利观测光场,利用 GPSR 的压缩感知重构算法获得图像。在光场的传播过程中,以光场的衍射效应为主要影响因素,通过计算强度扩散函数修正预置光场,实验证明修正光场符合真实的光场,仍然满足列相干性的要求,可以实现压缩感知。通过桶探测器探测的数据,利用贝努利观测矩阵和实际观测矩阵重构得到图像,后者成像质量更高,在实际使用中具有主要意义。当成像系统更加复杂,成像距离更远,影响光场的因素更多时,该方法也可以推广,用得到的修正光场做成像研究。

参考文献:

- [1] Klyshko D N. Combine EPR and two-slit experiment: Interference of advanced waves[J]. Physics Letter A, 1988, 132(6): 299 - 304.
- [2] JIAO Licheng, YANG Shuyuan, LIU Fang, et al. Development and prospect of compressive sensing[J]. Chinese Journal of Electronics, 2011, 7(7): 1651 - 1661. (in Chinese)
焦李成, 杨淑媛, 刘芳, 等. 压缩感知回顾与展望[J]. 电子学报, 2011, (7): 1651 - 1660.
- [3] YAN Fengxia, WANG Zelong, ZHU Jubo, et al. Compressive sensing theory and optical compressive imaging system[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2014, 36(2): 140 - 147. (in Chinese)
严奉霞, 王泽龙, 朱炬波, 等. 压缩感知理论与光学压缩成像系统[J]. 国防科技大学学报, 2014, 36(2): 140 - 147.
- [4] Katz O, Bromberg Y, Silberberg Y. Compressive ghost imaging[J]. Applied Physics Letters, 2009, 95(13): 131110 - 131110 - 3.
- [5] XUE Yulang, WAN Rengang, FENG Fei, et al. Lensless

- ghost imaging experiments in three different configurations [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(8): 1–6. (in Chinese)
- 薛玉郎, 万仁刚, 冯飞, 等. 三种不同结构的无透镜鬼成像实验[J]. *光子学报*, 2014, 43(8): 1–6.
- [6] ZHANG Na. Polarization ghost imaging system based on compressed sensing[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2014, 31(6): 656–662. (in Chinese)
- 张娜. 基于压缩感知的偏振鬼成像系统[J]. *量子电子学报*, 2014, 31(6): 656–662.
- [7] KONG Qingnan, WANG Shande, ZHANG Chi, et al. Influence of laser speckle average size on ghost imaging[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(10): 198–204. (in Chinese)
- 孔庆楠, 王善德, 张驰, 等. 激光散斑平均尺寸对关联成像重构的影响[J]. *光学 精密工程*, 2015, 23(10): 198–204.
- [8] WANG Qiang, LI Jia, SHENG Yi. A survey on deterministic measurement matrix construction algorithms in compressive sensing [J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2013, 10(10): 2041–2050. (in Chinese)
- 王强, 李佳, 沈毅. 压缩感知中确定性测量矩阵构造算法综述[J]. *电子学报*, 2013, 10(10): 2041–2050.
- [9] D Donoho. Compressed sensing [J]. *IEEE Transactions On Information Theory*, 2006, 52(4): 1289–1306.
- [10] LIU Bin, TIAN Zhongjia. Image fusion algorithm based on improved PCNN in compressed sensing domain[J]. *Laser & Infrared*, 2015, 45(11): 1392–1396. (in Chinese)
- 刘斌, 田中佳, 基于改进 PCNN 的压缩感知域图像融合[J]. *激光与红外*, 2015, 45(11): 1392–1396.
- [11] HE Guodong, SHI Jianping, FENG Youhong, et al. Fusion algorithm for infrared and visible image based on compressive sensing [J]. *Laser & Infrared*, 2014, 44(5): 582–584. (in Chinese)
- 何国栋, 石建平, 冯友宏, 等. 基于压缩感知的红外与可见光图像融合算法[J]. *激光与红外*, 2014, 44(5): 582–584.
- [12] DONG Xiaoliang, ZHAO Shengmei, ZHENG Baoyu. Application of compressed sensing in ghost imaging system [J]. *Journal of Signal Processing*, 2013, 29(6): 677–682. (in Chinese)
- 董小亮, 赵生妹, 郑宝玉. 压缩感知重构算法在“鬼”成像中的应用研究[J]. *信号处理*, 2013, 29(6): 677–682.
- [13] LI Sen, MA Caiwen, LI Yan, et al. Survey on reconstruction algorithm based on compressive sensing [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(S1): 225–232. (in Chinese)
- 李坤, 马彩文, 李艳, 等. 压缩感知重构算法综述[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(S1): 225–232.
- [14] GUO Shuxu, ZHANG Chi, CAO Junsheng, et al. Object reconstruction by compressive sensing based normalized ghost imaging [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(1): 288–294. (in Chinese)
- 郭树旭, 张驰, 曹军胜, 等. 基于压缩感知归一化关联成像实现目标重构[J]. *光学 精密工程*, 2015, 23(1): 288–294.