

文章编号 1004-924X(2014)06-1438-08

双臂对称性对压缩传感用于关联成像重构的影响

王铭海¹, 曹军胜², 鄒峰利^{1*}

- (1. 吉林大学 电子科学与工程学院 集成光电子学国家重点联合实验室 吉林大学实验区, 吉林 长春 130012;
2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:根据压缩传感理论和关联成像模型,将压缩传感理论应用于关联成像中,实现了传统的双臂关联成像的压缩传感重构。通过仿真实验验证了压缩传感用于关联成像的可行性,以峰值信噪比(PSNR)为衡量指标,分别对压缩传感和传统关联算法的重构图像质量进行了量化。仿真实验表明,压缩传感和关联算法的重构效果均随测量次数的增加而变优,在相同的测量次数下,压缩传感在关联成像中的重构图像的 PSNR 比传统的关联重构图像高 20 dB 以上。将压缩传感用于实际双臂关联成像的实验结果表明,压缩传感可以实现双臂关联成像装置的图像重构,但其重构质量很难优于传统关联算法的重构。针对这一实际实验与仿真实验似乎相矛盾的特殊现象,从双臂对称性的角度进行了合理解释,并利用实验中实际的散斑场对该现象进行了验证,最后提出了解决方案。

关键词:关联成像;双臂关联成像装置;双臂对称;压缩传感;稀疏表示;图像重构

中图分类号:TP391;TN27 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142206.1438

Influence of two-arm symmetry on reconstructed image of compressive sensing for ghost imaging

WANG Ming-hai¹, CAO Jun-sheng², GAO Feng-li^{1*}

- (1. *State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China;*
2. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*)
** Corresponding author, E-mail: gaofl@jlu.edu.cn*

Abstract: According to Compressive Sensing (CS) algorithms and the Ghost imaging (GI) model, the CS was applied to the GI system to complete the CS reconstruction of an image. The feasibility of CS applied in GI was firstly validated by a simulation experiment. By using Peak Signal to Noise Ratio (PSNR) as the measure, the reconstructed images based on CS and traditional GI correlation algorithms were quantified respectively. The simulation experiment results indicate that both the reconstructed images are getting better with the increase of the number of measurements, however, the PSNR of CS reconstruction image is above 20 dB higher than that of the traditional correlation reconstruction method at the same number of measurements. Furthermore, the CS was applied in an actual two-arm

收稿日期:2013-08-16;修订日期:2013-10-31.

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(No. 61204055);吉林省科技发展计划青年科研基金资助项目(No. 20130522188JH)

GI experiment. The experiment results indicate that the CS can achieve the image reconstruction of two-arm correlation imaging equipment, but its reconstruction quality is hard to be better than that of the GI correlation algorithm. For this special confliction phenomenon, the paper gives some reasonable interpretations from the two-arm symmetry perspective and then fully validates the interpretations by using the actual speckle pattern from the experiment. Finally, it proposes a solution scheme.

Key words: ghost imaging; two-arm ghost imaging system; two-arm symmetry; compressed sensing; sparse representation; image reconstruction

1 引言

关联成像也称“鬼”成像(Ghost Imaging, GI)作为一种新兴的成像技术,在医学、军事、天文、遥感等领域有着广阔的应用前景^[1-10]。它通过不包含物体的参考臂和无空间分辨率的物臂探测器(单像素)的相关运算,可以重构出物体的图像。传统的光学成像基于光场幅值和相位的一阶关联性,其成像系统受到探测端有限视图的约束,而关联成像可使探测和成像分离,实现了非局域成像。早期的关联成像基于量子光学理论的纠缠光子对研究^[1-2],随后利用赝热光源来实现关联成像,由此不仅促进了关联成像由理论到实验的较大进展,并且取得了大量的研究成果^[3-10]。这些成果使关联成像的工作环境更加简单,距实用化更近一步。然而,采用传统的关联成像图像重构方法获得高信噪比的重构图像需要进行大量的数据采集,不仅实验耗时过长,而且对数据的采集、存储及处理的硬件要求较高。

近年来,压缩传感(Compressive Sensing, CS),作为一种新兴的理论受到了人们的关注,它实现了远低于 Nyquist 采样频率下对信号的采样和重构^[11-13]。该技术具有较低的采样频率,节约了硬件的传输和存储成本,降低了计算复杂度,并已成功地应用到光学成像领域中^[7-10, 14-16]。文献[7]和[8]分别采用空间光调制器(Spatial Light Modulator, SLM)和数字微镜器件(Digital Micro-mirror Device, DMD)实现了关联成像的压缩传感重构,由于其照射到目标上的散斑场或随机光场由计算机控制产生,其参考臂为虚拟参考臂,因此信号采集装置不需要实际参考臂,与传统的双臂关联成像装置相比,不仅实验成本低,实验难度也小得多。文献[9]把压缩传感用于实际双臂

关联成像中,验证了信号越稀疏其重构效果越好。文献[10]从仿真实验的角度验证了一种压缩感知用于差分关联成像的方案。文献[14]首次把压缩传感理论用于光声成像(Photoacoustic Imaging, PAI)技术中,改进了原有的数据采集与图像重构方案,减少了超声换能器的机械扫描次数,获得了较理想的成像效果。文献[15]实现了基于压缩传感的单像素相机,其基本理论与利用 DMD 实现压缩传感的关联成像理论相似。文献[16]利用压缩传感理论实现了相对较少数据采集量下的极弱光计数成像。

本文在研究关联成像模型和压缩传感理论的基础上,把压缩传感理论应用于关联成像中。通过仿真实验实现了离散小波变换的压缩传感重构(CSGI-DWT)和快速傅里叶变换的压缩传感重构(CSGI-FFT)。仿真实验结果表明,关联成像的压缩传感成像效果要远优于传统的关联重构算法。此外,针对传统的双臂关联成像装置,将压缩传感作为图像数据采集和处理方案应用于实际测量中,实现了压缩传感用于传统的双臂关联成像装置的图像重构实验。但是其实验效果较仿真实验有一定的差异,论文针对这种差异现象进行了合理的解释,最后利用实际散斑图像对该现象做了有效的验证,并提出了改进意见。

2 实验及理论模型

关联成像实验装置如图 1 所示,采用半导体激光器为激光源,会聚到由计算机控制旋转的毛玻璃上形成散斑场作为赝热光源,再由一个 50:50 的分束棱镜分成物臂(透射光束)和参考臂(反射光束)两束光路。物体对透射光束强度调制后,光束经过一透镜被 CCD1 记录,由计算机获取并相加 CCD1 各像素的强度值,以实现物臂的桶

测量;参考光路的 CCD2 探测器置于物体关于分束器镜面对称的位置,以记录照射在物体上散斑场的光强分布;最后,由计算机对两路光进行强度关联运算重构物体的像。

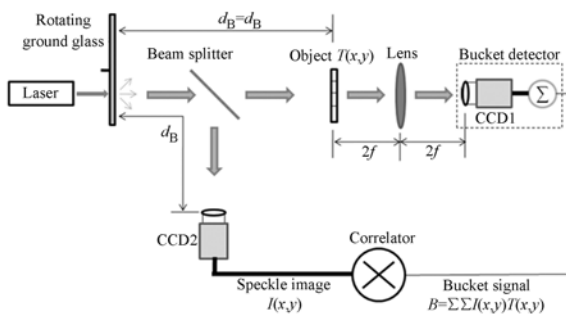


图 1 关联成像实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of GI experiment setup

像的重构过程实质为解调过程,传统双臂关联成像装置的像重构算法可表示为^[7]:

$$T_{GI}(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (B_n - \langle B_n \rangle) I_n(x, y), \quad (1)$$

其中: $B_n = \iint I_n(x, y) T(x, y) dx dy$ 为照射到物体上的第 n 幅散斑场经由物体调制后的总光强,由桶探测器记录; $\langle B_n \rangle = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N B_n$ 为所有 N 次桶探测的平均值,它实质为 B_n 的直流分量; $I_n(x, y)$ 为照射到物体上的第 n 幅散斑场; x, y 为二维空间坐标。由于 CCD2 与物体关于分束器镜面对称,由参考光路 CCD2 测量的散斑场为 $I_n(x, y)$,且物臂的 B_n 和参考臂的 $I_n(x, y)$ 的每次测量必须由计算机同步完成,所以,式(1)实质上是参考臂与物臂的二阶强度关联函数。

上述基于二阶强度关联函数的重构算法受到采样次数的限制,即要重构出具有较高信噪比的图像,必须获得足够多的采样次数,所以,为了提高成像效率和降低成像系统的硬件要求,减少测量次数成为解决关联成像的关键问题之一。近年来兴起的 CS 理论实现了在远小于 Nyquist 采样频率的情况下,用很少的测量次数来精确重构原始信号。

CS 理论的测量过程可以被描述为^[10-12]:

$$y = \Phi x, \quad (2)$$

其中: $x \in \mathbf{R}^{N \times 1}$ 为待重构的原始信号(待测向量), y 为 M 个测量值, $\Phi \in \mathbf{R}^{M \times N}$ 为一 M 行 N 列的矩阵,称为测量矩阵,常采用随机矩阵。显然 y 是 x 在 Φ 下的线性投影。当 $M \ll N$ 时,式(2)有无穷多解,此时如果原始信号 x 是非稀疏向量,则不能重构出原始信号;但是如果 x 是 K 稀疏的,则可以通过求解数学凸优化问题来精确重构原始信号^[11],即:

$$\hat{x} = \operatorname{argmin} \|x\|_p \quad \text{s. t.} \quad \Phi \hat{x} = y, \quad (3)$$

其中: $\|\cdot\|_p$ 表示向量的 l_p 范数。此时,信号的重建效果取决于测量次数和信号稀疏度,在理论上, $M \approx 4K$ 或 $M \geq K \log_2 \left(\frac{N}{K} \right)$ 时,可以完美重构原始信号。

虽然自然界的信号在时域往往是非稀疏的,上述信号重构理论不能直接应用于自然非稀疏信号的重构,但是,自然非稀疏信号可以通过某种变换进行稀疏表示。设 $\Psi \in \mathbf{R}^{N \times N}$ 为该变换矩阵, $f = \Psi x$ 为 x 在变换域的稀疏表示,反变换为 $x = \Psi^{-1} f$,则式(2)等价于:

$$y = \Phi x = \Phi \Psi^{-1} f = T f, \quad (4)$$

其中: $T = \Phi \Psi^{-1}$ 称为传感矩阵。因为 f 是稀疏的,则式(3)转化为求解如下凸优化问题:

$$\hat{f} = \operatorname{argmin} \|f\|_p,$$

$$\text{s. t.} \quad T \hat{f} = \Phi \Psi^{-1} \hat{f} = y. \quad (5)$$

然后,通过反变换 $\hat{x} = \Psi^{-1} \hat{f}$ 获得原始信号的精确估计。

由此可知,CS 理论主要集中在信号的随机矩阵测量、稀疏表示及凸优化问题的求解上。根据双臂关联成像装置的信号采集过程可知,由桶探测器获得的 B_n 视为测量向量 y 的第 n 个元素,由参考臂获得的第 n 个散斑场 $I_n(x, y)$ 按照某种二维空间排列顺序(如逐行或逐列),构成测量矩阵 Φ 的第 n 行,参考臂及物臂同步进行 M 次测量和记录,则关联成像的数据测量过程满足式(2)。然后,通过构造一种正交变换矩阵 Ψ 去稀疏化原始信号,计算其逆变换矩阵 Ψ^{-1} 和传感矩阵 $T = \Phi \Psi^{-1}$,使得关联成像的数据测量过程满足式(4),通过解式(5)凸优化问题得到原始信号的稀疏化向量,最后通过反变换矩阵获得原始信号。此时,获得的原始信号为一维向量,需按照构造测量矩阵 Φ 的行向量的二维空间排列顺序,进行逆排列从而获得物体的二维图像。

实验中,分别采用离散小波变换(Disperse Wavelet Transform, DWT)和快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)构造变换矩阵 Ψ ,并计算逆变换矩阵 Ψ^{-1} 。散斑场具有很强的随机性,所以满足 Φ 和 Ψ^{-1} 极端不相似,然后由 $T = \Phi\Psi^{-1}$ 计算传感矩阵 T 。根据压缩传感原理,在物臂和参考臂端只需同步进行 $M \geq 4K$ 次测量即可完成图像的恢复。在已知传感矩阵 T 和测量向量 y 的条件下,采用正交匹配追踪算法(Orthogonal Matching Pursuit, OMP)^[17]求解凸优化问题。程序采用 Matlab 编写,该算法的基本步骤为:(1)建立一空矩阵 ϕ_i 为重建原子集合,建立一个索引集合 I 来记录最大内积对应的位置;(2)定义一个长度为 N 的待重构向量 f ,并把所有元素初始化为0,定义残差向量 r_i 并初始化为 y ,给定稀疏度 K (实验中 K 取 $M/4$);以初始值 $i=1$ 为循环控制变量循环执行步骤(3)~(7):(3)计算残差 r_i 与 T 各列向量的内积值,并找出最大内积所对应的位置,即 T 的第 n 列 T_n ;(4)更新索引集 $I(i)=n$,更新重建原子集合 $\phi_i = [\phi_i, T_n]$;(5)由最小二乘法估计待测向量的非零值 $\hat{f}_i = (\phi_i' \phi_i)^{-1} \phi_i' y$;(6)更新残差 $r_i = y - \phi_i \hat{f}_i$,更新循环控制变量 $i=i+1$,并把 T 的第 n 列全部置零;(7)判断循环控制变量是否满足 $i > K$ 或残差是否足够小,从而终止循环计算;(8)根据索引集 I_i 和待测向量的非零值 \hat{f}_i 计算最终估计 $f(I) = \hat{f}_i$,最后由逆变换 $\hat{x} = \Psi^{-1} f$ 获得 x 的最终估计。

3 实验结果与分析

作为科学研究的一个重要手段,为了验证压缩传感应用于关联成像的可行性和比较它与传统重构算法的优劣,首先进行了数值仿真实验。根据文献[18]给出的散斑场的数值仿真算法,通过 Matlab 计算生成散斑场。其中,设定仿真输入的激光光斑的直径为18个像素,合成 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$ 的散斑图像,取其中心 $64 \text{ pixel} \times 64 \text{ pixel}$ 的区域作为照射目标的散斑图像。采用 $64 \text{ pixel} \times 64 \text{ pixel}$ 的Lena局部图像作为目标物体进行仿真实验。分别进行了传统的关联算法重构(GI)、基于DWT矩阵的压缩传感重构(CSGI-DWT)和FFT矩阵的压缩传感重构(CSGI-FFT)实验,结果如图2所示。其中,原始图像有4 096

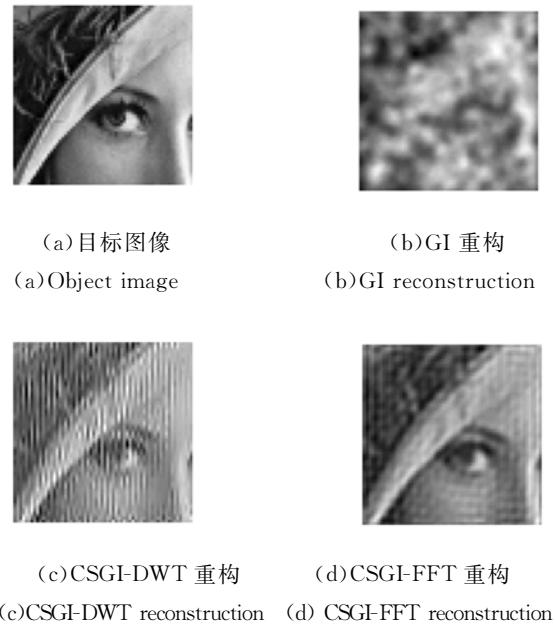


图2 图像重构仿真结果

Fig. 2 Simulation results for image reconstruction

个像素,实验中采用的测量次数为3 200。

从实验结果可以看出,在相同的测量次数下,CS重构结果远比传统的GI关联算法理想,由此说明CS理论应用于关联成像系统中可以获得更好的图像重构效果。

在评价信号的失真程度时,峰值信噪比(PSNR)不受限于某一类信号的内容特征,具有很强的适用性,所以为了更客观地衡量重构信号,本文引入PSNR作为评价重构图像质量的指标来量化上述3种算法的重构结果,分析结果如图3所示。

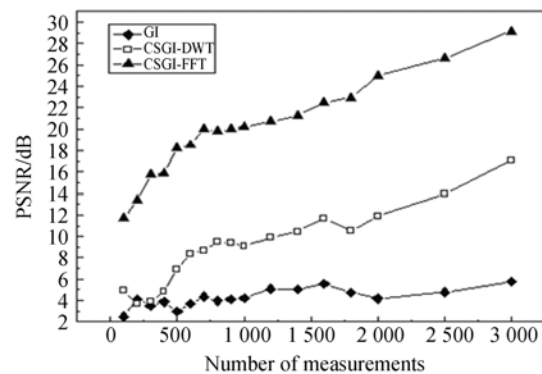


图3 GI、CSGI-DWT和CSGI-FFT的PSNR对比

Fig. 3 Comparison of PSNR among GI, CSGI-DWT and CSGI-FFT

由图 3 可以看出,3 种重构图像的 PSNR 随测量次数的增加均呈现递增的趋势。其微小的波动是由于散斑场的随机性和统计特性造成的,这说明随着测量次数的增加,重构图像的整体效果越来越好。此外,在相同的测量次数下,CSGI-FFT 的成像效果最好,CSGI-DWT 次之,传统的 GI 最差,从而进一步证明了 CS 重构的图像要远比传统的 GI 关联算法的重构图像结果理想;同时对于局部图像,FFT 的稀疏化结果要比 DWT 强。最后,组织 10 名实验人员对重构图片质量进行评分,主观评价与 PSNR 客观评价的关系如表 1 所示。

表 1 重构图像效果的主观评价与客观评价(PSNR)

Tab.1 Objective and subjective evaluations of PSNR of reconstruction images

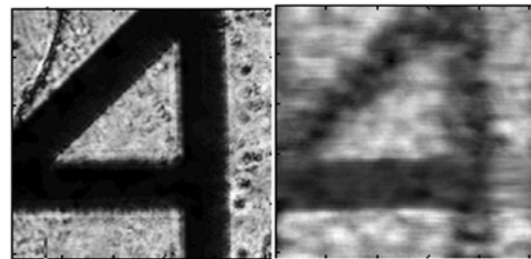
评分	主管评价	PSNR/dB	说明
5	优秀	$[30, +\infty)$	图像与目标物体图像几乎相同
4	良好	$[20, 30)$	图像有很小干扰,很容易辨认
3	中等	$[15, 20)$	图像有一些干扰,可以辨认
2	差	$[10, 15)$	图像质量差,很难辨认
1	很差	$(-\infty, 10)$	图像无法辨认

通过比较 PSNR 数据与主观评价结果发现,数据基本符合视觉对图像质量的评价。在实验中发现两幅图像的 PSNR 相差小于 5 dB 时,视觉评价结果的一致性差,所以当测量次数间隔较少时,会引起 PSNR 数值在 5 dB 范围内波动,此时主观评价的一致性差。结合图 3 可以进一步看出,CSGI-FFT 重构算法在测量次数大于 1 000 次后,重构效果已达良好以上,CSGI-DWT 算法的重构效果也很接近中等程度,而传统关联 GI 算法在测量 3 200 次时重构图像仍无法辨认。上述仿真实验证明,要获得相同效果的重构图像,CS 重构算法所需要的测量次数要远远少于传统关联算法;在相同次数下,CS 算法要比 GI 关联算法的成像效果好。

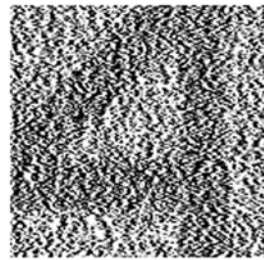
在图 1 所示的关联成像实验平台上,参考光路的 CCD2 探测器架设在五维调整平台上,以实现 CCD2 与目标物体关于分束器镜面对称;物臂的透镜焦距 f 为 15 cm,架设在沿物臂光路可调整的一维调整架上,使物体的像等大地呈现在物臂探测器 CCD1 上(物体到透镜的距离和 CCD1

到透镜的距离均为 $2f$)。最后由计算机计算 CCD2 各像素的灰度值总和来实现物臂的桶测量。

实验中,双臂的数据采集要同步。由于测量系统硬件条件的限制,实验的测量次数仅为 200 次,而 CCD 图像传感器采集的图像像素为 $1\ 396 \times 1\ 024$,所以取其中心的 256×256 像素,逐行进行关联成像实验,即通过计算机把 CCD1 获取图像每一行的灰度值相加作为该行的桶测量结果,对应 CCD2 散斑场图像的行为测量矩阵的一个行向量。分别通过关联运算和 CS 运算重构出该行向量,最后按顺序排列各行向量来实现原始图像的复原。实验中通过 DWT 产生变换矩阵,结果如图 4 所示。



(a) 目标图像 (a) Object image
(b) GI 重构结果 (b) GI reconstruction



(c) CS 重构结果
(c) CS reconstruction

图 4 关联成像实验结果

Fig. 4 Experiment results of GI

由图 4 可以看出,压缩传感实现了目标图像的重构,说明 CS 可以应用于传统双臂关联成像系统的目标重构。通过比较图 4(b)、4(c)发现,CS 的重构效果并不像仿真实验那样明显地优于传统的 GI 关联算法。经分析,这是由仿真实验与真实实验的区别造成的。在图 1 所示的实际双臂关联成像装置中,CCD2 与目标物体关于分束

器镜面应严格对称,这样才可以准确获取照射到目标上的散斑场分布,但是实际中这一点很难做到;而仿真实验在完全理想的情况下进行,同样对于利用 SLM 或 DMD 的虚拟参考臂成像装置^[7,8,15],其照射到目标上的散斑场或随机光场直接由计算机产生,无需参考臂对散斑场或随机光场的采样,所以其实验难度较传统的双臂装置小得多,但是成本较高。当 CCD2 偏离正确位置,关于分束器镜面不能与目标物体完全对称时,分析式(1)可知,GI 关联算法仅会使重构图像发生偏移,而不会影响重构图像的清晰程度;但是 CS 重构算法则会直接影响测量矩阵构造的精确程度,当不能获得精确的测量矩阵时,就不能获得清晰的重构图像。

为了验证上述分析,利用实验中获得的实际散斑场作为照射目标物体的光场,同时构造测量矩阵,以像素为 256×256 的 Lena 图像作为目标物体进行后续的仿真关联成像实验。测量次数同样为 200 次,图像的重构过程与实际实验过程相同,即逐行模拟关联成像实验,实验结果如图 5 所示,其中,图 5(f)为参考臂探测器与目标物体关于分束器镜面不对称时的 CS 重构图像,此时取散斑场垂直向下偏移对称点一个像素来仿真参考臂探测器与目标物体关于分束器镜面的不对称情况。

由图 5 可以看出,在参考臂探测器与目标物体关于分束器镜面严格对称的情况下,CS 重构图像效果仍明显优于关联 GI 重构图像。由此说明,图 5(b)所示的在实际实验中所获得的散斑场的随机性完全可以满足 CS 理论构造测量矩阵的要求。比较图 5(d)、5(e)可以发现,对细节较多的灰度图像进行重构时,CSGI-DWT 算法比 CSGI-FFT 算法的效果好,所以在参考臂探测器与目标物体不对称于分束器镜面时,使用 CSGI-DWT 来重构图像,如图 5(f)所示,此时明显可以看出重构图像十分模糊。与图 5(c)所示的同样模糊的关联 GI 重构图像相比,此时的 CS 算法没有表现出其优势,说明参考臂探测器与目标物体的对称性对 CS 算法的成像效果影响很大。因此,在传统的双臂关联成像系统中,CS 算法要想得到高质量的重构图像,必须在参考臂光路中准确获取照射在目标物体的散斑场。

为了有效地保证参考臂探测器与目标物体关

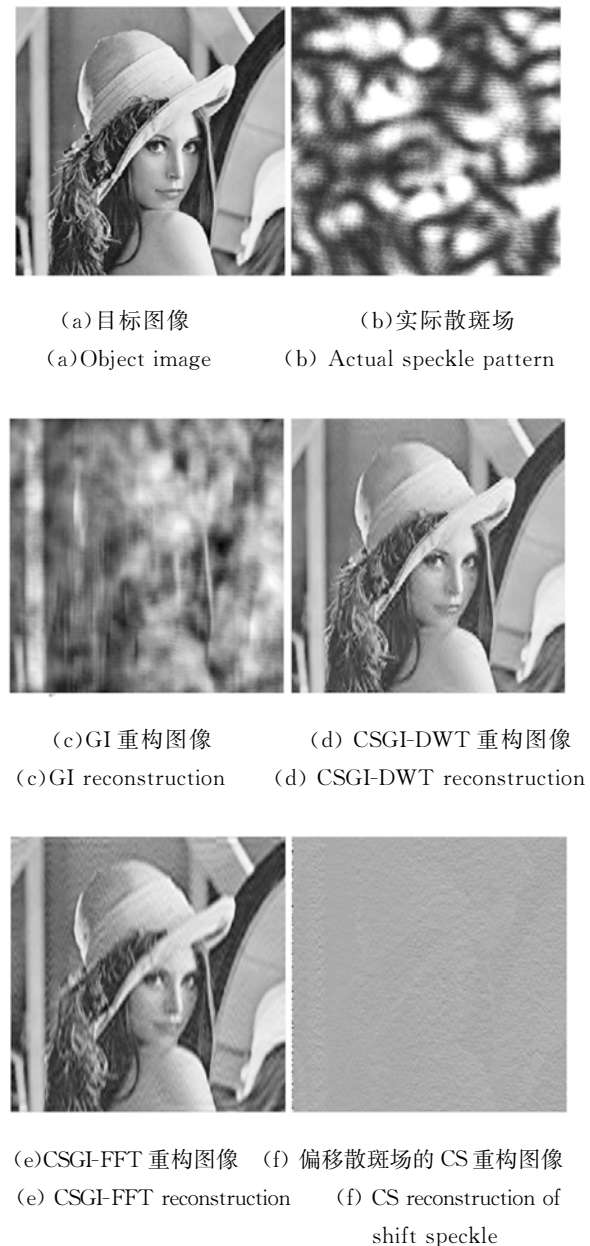


图 5 使用实际偏移散斑场的仿真实验结果

Fig. 5 Simulation results using actual speckle pattern

于分束器镜面更加准确对称,以准确获取照射在目标物体的散斑场,实验前需要精确地调节实验平台。首先调节目标物体和 CCD1 到透镜的距离,使得目标物体等大地成像在 CCD1 上;然后在不放置目标物体的情况下,通过反复调节架设参考臂探测器 CCD2 的五维调整平台,同时计算机实时计算两臂图像的互相关性,通过计算机屏幕观察互相关性的三维曲线及沿 x 方向和 y 方向的互相关曲线,当 x 和 y 方向的互相关曲线的峰值均位于中心且左右对称时,可认为双臂探测器

测得的图像在像素点上一一对应,参考臂探测器获得的散斑场与照射在目标物体的散斑场分布相同,此时通过 CS 算法将能得到高质量的重构图像。

4 结 论

本文将 CS 理论应用于关联成像系统中,实现了传统的双臂关联成像的压缩传感重构。以 PSNR 为衡量指标,分别对 CSGI-FFT、CSGI-DWT 和关联 GI 3 种算法的成像效果进行了量化,发现在同样的采样次数下,CS 重构图像的 PSNR 比传统关联算法重构图像至少高出 20 dB。3 种算法的成像效果均随测量次数的增加而变优,且对于细节较少的图像,CSGI-FFT 算法优于

CSGI-DWT 算法;对于细节较多的图像,CSGI-DWT 算法优于 CSGI-FFT 算法。在双臂关联成像实验中,利用 CSGI-DWT 算法对图像实现了重构。实验结果表明,CS 理论可应用于传统双臂关联成像系统的目标重构。但实际实验结果却很难与仿真实验的压缩传感效果相比,论文合理地解释了该现象,并用实验中获得的散斑场模拟照射目标物体,从而验证了该现象。最后提出了基于 CS 理论的提高重构图像质量的实验解决方案。

5 致 谢

感谢美国 Northwestern University 的功能光学成像实验室(FOIL)的 Dr. Hao F. Zhang 在实验上提供的帮助。

参考文献:

- [1] PITTMAN T B, SHIH Y H, STREKALOV D V, *et al.*. Optical imaging by means of two-photon quantum entanglement[J]. *Phys. Rev. A*, 1995, 52(5): R3429-R3432.
- [2] MEYERS R E, DEACON K S. Quantum ghost imaging experiments at ARL[J]. *SPIE*, 2010, 7815: 78150I-1.
- [3] SHAPIRO J H. Computational ghost imaging [J]. *Phys. Rev. A*, 2008, 78(6): 061802-1-4.
- [4] FERRI F, MAGATTI D, LUGIATO L A, *et al.*. Differential ghost imaging [J]. *Phys. Rev. L.*, 2010, 104(25): 253603-1-4.
- [5] BROMBERG Y, KATZ O, SILBERBERG Y. Ghost imaging with a single detector [J]. *Phys. Rev. A*, 2009, 79(5): 053840-1-4.
- [6] CHEN X, AGAFONOV I N, LUO K, *et al.*. High-visibility, high-order lensless ghost imaging with thermal light [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(8): 1166-1168.
- [7] KATZ O, BROMBERG Y, SILBERBERG Y. Compressive ghost imaging [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95(13): 131110-1-3.
- [8] 陆明海, 沈夏, 韩中生. 基于数字微镜器件的压缩感知关联成像研究 [J]. *光学学报*, 2011, 31(7): 98-103.
- [9] DU J, GONG W, HAN S. The influence of sparsity property of images on ghost imaging with thermal light [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(6): 1067-1069.
- [10] 白旭, 李永强, 赵生妹. 基于压缩感知的差分关联成像方案研究 [J]. *物理学报*, 2013, 62(4): 044209-1-8.
- [11] BAI X, LI Y Q, ZHAO SH M. Differential compressive correlated imaging [J]. *Acta Phys. Sin.*, 2013, 62(4): 044209-1-8. (in Chinese)
- [12] 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.
- [13] CANDÈS E, ROMBERG J. Sparsity and incoherence in compressive sampling [J]. *Inverse Problems*, 2007, 23(3): 969-985.
- [14] CANDES E, WAKIN M. An introduction to compressive sampling [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2008, 25(2): 21-30.
- [15] LIANG D, ZHANG H F, YING L. Compressed-sensing photoacoustic imaging based on random optical illumination [J]. *International Journal of Functional Informatics and Personalised Medi-*

- cine*, 2009, 2(4): 394-406.
- [15] ZAMBRANO-NUNEZ M, MARENGO E A, FISHER J M. Coherent single-detector imaging system [C]. *IEEE*, 2010:111-115.
- [16] 俞文凯, 姚旭日, 刘雪峰, 等. 压缩传感用于极弱光计数成像[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(10):2283-2292.
- YU W K, YAO X R, LIU X F, *et al.*. Compressed sensing for ultra-weak light counting imaging[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(10): 2283-2292. (in Chinese)
- [17] TROPP J A, GILBERT A C. Signal recovery from random measurements via orthogonal matching pursuit[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2007, 53(12):4655-4566.
- [18] DUNCAN D D, KIRKPATRICK S J. Algorithms for simulation of speckle (laser and otherwis)[C]. *SPIE*, 2008, 6855:685505-1-8.

作者简介:



王铭海(1986—),男,吉林省吉林市人,2011年于吉林大学获得学士学位,主要从事无线传感器网络,压缩传感算法的研究。E-mail: eetube@gmail.com



郭峰利(1977—),男,河南沁阳人,博士,副教授,2001年,2004年,2008年于吉林大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事半导体激光器可靠性和弱信号检测方面的研究。E-mail: gaofl@jlu.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)