

文章编号: 1005-5630(2020)02-0032-07

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5630.2020.02.006

# 提高关联成像重构质量的研究

张雷洪, 张志晟, 樊丽萍

(上海理工大学 出版印刷及艺术设计学院, 上海 200092)

**摘要:** 比较基于压缩感知关联成像(CGI)与伪逆关联成像(PGI)两者之间的成像效果差异,探讨形态学权重自适应对关联成像去除噪声的效果。选择不同的图像,通过MATLAB软件开展仿真实验,对目标图像分别采样64、256、512、1 024、2 048、3 000次,首先通过关联成像、基于压缩感知关联成像与伪逆关联成像三种方法重构图像,再对比压缩感知与伪逆两种方法重构图像的效果,以峰值信噪比(PSNR)、相关系数(CC)为量化指标,将基于压缩感知关联成像与伪逆关联成像在不同采样次数下进行对比分析。同时,通过实验分析形态学权重自适应去除关联成像中噪声的效果。伪逆关联成像在低次数采样的情况下比基于压缩感知关联成像的成像效果更好,在高采样次数下,基于压缩感知关联成像的成像效果更好。在实际重构中压缩感知关联成像重构的图像仍有噪声,形态学权重自适应可以有效去除关联成像实验中产生的噪声。

**关键词:** 关联成像; 目标重构; 压缩感知; 伪逆矩阵

**中图分类号:** TP 751 **文献标志码:** A

## A comparative study of reconstruction methods for ghost imaging

ZHANG Leihong, ZHANG Zhisheng, FAN Liping

(College of Communication and Art Design, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** To compare the imaging effects between compressed sensing ghost imaging (CGI) and pseudo-reverse ghost imaging (PGI) and explore the effect of morphological weight adaptive on correlated imaging to remove noise. Different images were selected, and simulation experiments were carried out by MATLAB software. The target images were sampled with 64, 256, 512, 1 024, 2 048, and 3 000 rate respectively. The images were reconstructed by correlation imaging, compressed sensing ghost imaging and pseudo-reverse ghost imaging. The two methods to reconstruct the image effect, and then using the peak signal-to-noise ratio (PSNR) and correlation coefficient (CC) as the quantitative indicators, the compressed sensing ghost imaging and pseudo-reverse ghost imaging were used under different usage times. A comparative analysis was

收稿日期: 2019-05-22

作者简介: 张雷洪(1981—), 男, 副教授, 研究方向为印刷包装技术与数据模拟仿真。E-mail: zlh12345\_2004@sina.com.cn

conducted. At the same time, in the experiment, morphological weighted adaption was used to remove noise from compressed sensing ghost imaging. pseudo-inverse ghost imaging is better than compressed sensing ghost imaging in the case of low-order sampling. Under high sampling rate, the imaging effect based on compressed sensing ghost imaging is better, but in the actual reconstruction, compressed sensing ghost imaging still has noise, and the morphological weight adaption can effectively remove the noise in the ghost imaging experiment.

**Keywords:** ghost imaging; target reconstruction; compressed sensing; pseudo-inverse

## 引 言

关联成像(GI), 又称鬼成像, 它是利用量子纠缠特性或空间强度关联获取物体像<sup>[1]</sup>的一种新型成像方法。由 Pittman 等根据 Klyshko 提出的基于纠缠光子对的方案实现关联成像实验后, 催生了许多新研究<sup>[2-6]</sup>。与传统成像不同, 关联成像是一种非局域成像方式<sup>[7-8]</sup>。关联成像具有广泛的应用前景, 例如移动物体关联成像、图像加密等。近年来, 许多学者提出了不同的用于改善图像质量和提高成像速度的重构方法。其中, 比较有代表性的是基于压缩感知关联成像和伪逆关联成像。基于压缩感知关联成像是利用压缩感知可以在远低于奈奎斯特采样率下对信号采样并以高质量重构图像的特点与关联成像结合, 该方法的提出成功解决了关联成像“成像时间长, 复杂物体成像的局部清晰度不高”的问题<sup>[1]</sup>。伪逆关联成像则是从优化算法入手, 通过求观测矩阵的伪逆矩阵而不是转置矩阵来进行计算<sup>[9-10]</sup>, 该方法不仅大大缩减了成像时间而且提高了重构图像的质量。这两种方法都是在关联成像基础上利用不同的目标重构算法达到减少成像时间、提高图像质量的目的, 然而这两种成像方法的成像效果却存在差异。本文将以此两种具有代表性的方法为例, 进行数值仿真, 比较不同方法的关联成像目标重构效果, 同时使用形态学权重自适应对关联成像重构结果进行去除噪声。

本文在压缩感知关联成像和伪逆关联成像的基础上, 在不同的采样次数下, 对两种图像重构方法所得出的图像进行对比, 在两种理论的基础上, 开展了数值仿真实验, 再以峰值信噪比(PSNR)、相关系数(CC), 作为量化指标并进行

分析。同时展现了使用形态学权重自适应对关联成像重构结果去除噪声的效果。本文对比了关联成像两种具有代表性的重构方法, 同时改进了应用于关联成像重构结果的形态学自适应滤波。在实际实验过程中, 为进一步提高关联成像的还原精度提供了参考意义。

## 1 理论方法

### 1.1 关联成像

计算关联成像原理如图 1 所示, 由  $N$  个正态高斯随机分布矩阵  $\varphi_n(x,y)$  在  $[0, 2\pi]$  上的均匀分布。空间光调制器对光场的强度进行调制, 每次调制产生强度分布为  $I(x,y)$  的散斑场, 将调制后的散斑场照射到物体  $T(x,y)$  的表面, 透过物体的光强值由点探测器探测记为  $B_n$ 。  $B_n$  重复测量计算  $N$  次得到  $n$  个不同的测量值  $\{B_i\}_{i=1}^N$ , 其中的  $I_n(x,y)$  是根据菲涅耳传播函数计算得到的, 计算式为

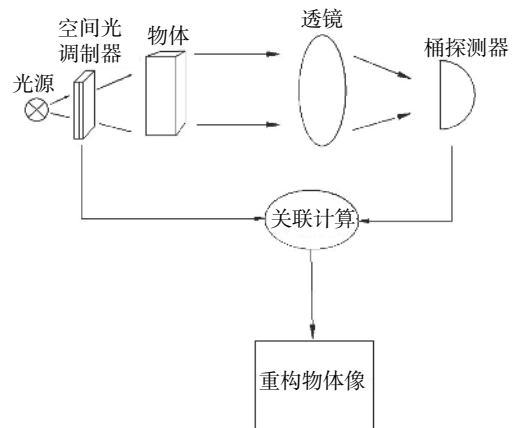


图 1 关联成像原理

Fig. 1 Principle of ghost imaging

$$B_n = \int I_n(x,y) T(x,y) dx dy \quad (1)$$

$$I_n(x,y) = |E_{in}(x,y) \exp[j\varphi_n(x,y)] \otimes h_z(x,y)| \quad (2)$$

$$T_{GI}(x,y) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (B_n - \langle B_n \rangle) I_n(x,y) \quad (3)$$

式中： $B_n$ 为桶探测器获得的第  $n$  次测量的总光强； $N$ 为总的测量次数； $\langle B_n \rangle$ 为  $N$  次测量的总光强平均值； $h_z(x,y)$ 为传播一段距离  $z$  时的菲涅尔衍射函数； $\otimes$ 代表卷积运算； $E_{in}(x,y)$ 为输入光的振幅分布； $T_{GI}$ 代表计算关联成像的重构图像。

关联成像作为一种统计算法，容易受到外界噪声的干扰，且成像探测所需时间和关联算法解析时间比较长，通常情况下成像清晰度不高。

从信号采集角度出发，压缩感知关联成像利用信息的稀疏特性，以低于奈奎斯特采样极限的速率获取信息，即采样速率可以低于信号带宽的两倍，而且能精确重构信号<sup>[11]</sup>。压缩感知关联成像在不丢失逼近原信号所需信息的情况下，用一个与变换基不相关的观测矩阵将变换所得高维信号投影到一个低维空间上，实现信号的降维处理，通过优化从少量的投影中以高概率重构出原信号，以实现在采样较少的情况下获得较为清晰的图片<sup>[12]</sup>，该过程表达式为

$$T_{CS} = T(x,y) : \operatorname{argmin} \|\Psi\{T(x,y)\}\|_{L1} \quad (4)$$

式中： $T_{CS}$ 代表压缩感知关联成像的重构图像； $\|\cdot\|_{L1}$ 为范数； $\Psi$ 为稀疏表示。从优化算法的角度出发，伪逆关联成像用观测矩阵的伪逆矩阵代替原有的转置矩阵<sup>[9-10]</sup>，其重构公式表示为

$$T_{PGI} = \frac{1}{M} \varphi^{-1} \varphi T \quad (5)$$

式中： $\varphi$ 为由  $M$  个散斑场排列而成， $M \times n^2$  的观测矩阵， $\varphi^{-1}$ 为  $\varphi$  的伪逆矩阵， $T$ 为目标物体的透射系数； $T_{PGI}$ 代表伪逆关联成像的重构图像。

通过理论分析可以看出，压缩感知关联成像和伪逆关联成像通过不同的方法实现减少成像时间、提高图像质量的目的。然而在信息传输过程中，信息将不可避免地受到噪声的干扰。在优化算法，增加抗干扰性的同时，也可使用不同的算法对重构图像进行去噪。

## 1.2 形态学权重自适应滤波

本文提出对重构图像使用形态学权重自适应去除噪声，与文献 [13] 不同，本文进行数学形态学自适应滤波时，将滤波后的重构图像与原图的差异值作为权值，对 4 种形态学自适应滤波进行了加权，以寻求更好的效果。根据重构图像中噪声的特点选用维数为 2~5 的线性结构元素，将 4 个方向 (+45°, -45°, 0°, 90°) 的滤波器先按维数由小到大进行串联，再将串联的滤波器进行并联，结合自适应权值算法构建复合滤波器，其公式为

$$F(x) = \sum_{i=1}^n a_i f_i(x) \quad (6)$$

式中： $F(x)$ 为去噪后的压缩感知关联成像重构图像； $f_i(x)$ 为串联滤波后的重构图像； $a_i$ 为权值，本文将串联滤波后的重构图像与原图的差异值作为权值。

## 2 数字仿真分析

本文选用 4 幅 32×32 的二值图像，即“上”“海”“理”“工”作为重构目标，开展数字仿真实验以对比压缩感知关联成像与伪逆关联成像的成像效果。对“上”“海”“理”“工”为目标的仿真实验结果如图 2、图 3、图 4、图 5 所示，其中，图 2 为原图像，图 3 为关联成像，图 4 为伪逆关联成像的重构结果，图 5 为基于压缩感知关联成像的重构结果。图 3、图 4、图 5 的采样次数  $N$  都为 3 000 次。通过对比结果可以看出：在采样次数都为 3 000 次的情况下，关联成像的重构图像不清晰，存在较多的噪声，仅能重构大致轮廓，重构效果不好；与关联成像相比，伪逆关联成像与压缩感知关联成像的成像效果有较大的改善，大部分重构图像可以清晰重构出原物体的像，但还是存在部分噪声，两者重构图像的轮廓也比较清晰；与关联成像相比，压缩感知关联成像和伪逆关联成像的重构效果有了更明显的改善，上述现象说明基于压缩感知关联成像和伪逆关联成像的重构结果都较好，重构图像的噪声得到了一定的抑制。



图 2 原图

Fig. 2 Original image



图 3 关联成像的重构结果

Fig. 3 Reconstruction results of ghost imaging



图 4 伪逆关联成像的重构结果

Fig. 4 Reconstruction results of pseudo-inverse ghost imaging



图 5 基于压缩感知关联成像的重构结果

Fig. 5 Reconstruction results based on compressed perceptual ghost imaging

本文选用灰度图像“大象”作为重构目标, 继续开展数字仿真实验, 对比压缩感知关联成像重构图像的去噪声效果。为了更好地模拟实际实验结果, 本文先对压缩感知关联成像重构后的图像使用松柏噪声, 再对其去噪。对灰度图像“大象”的仿真去噪声结果如图 6 所示。其中(a)为原图, (b)为压缩感知关联成像重构图, (c)为加噪声后图像, (d)为形态学权重自适应去噪声图, (e)为形态学串联去噪。通过对比可以看出, 单

纯的形态学串联去噪声算法可以去除部分噪声, 但会导致目标的失真, 使用形态学权重自适应去噪, 虽然仍有噪声, 但是通过调节权值可减少去除噪声时对目标图像的影响。

### 3 仿真数据分析

为了进一步分析伪逆关联成像和压缩感知关联成像的效果, 我们以峰值信噪比 (PSNR)、相关系数 (CC) 作为量化指标, 分别对伪逆关联成像和压缩感知关联在不同采样次数下得出的重构图像进行分析<sup>[14-16]</sup>。

#### 3.1 峰值信噪比

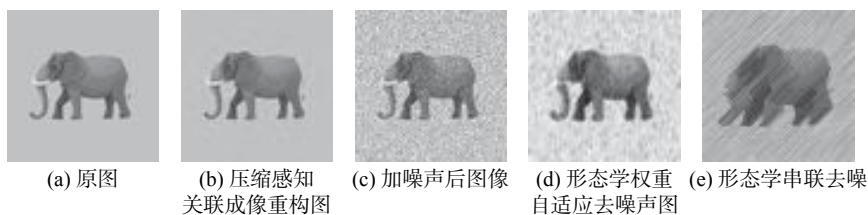
峰值信噪比常用 dB 来表示, 用于图像处理中对图像进行客观的评价, PSNR 也是衡量图像失真或是噪声水平的客观标准之一。峰值信噪比的定义为

$$\text{PSNR} = 10 \times \lg \left[ \frac{(2^m - 1)^2}{\text{MSE}} \right] \quad (7)$$

式中 MSE 表示原始图像与重构图像的均方差。

对比结果如图 7 所示, 其中 (a)、(b)、(c)、(d) 分别对应图 3、图 4、图 5 中的重构目标。从图可知, 在测量次数较低 64~1 024 次时, 散斑场的随机性比较大, 关联成像在测量次数增加的情况下, 其 PSNR 值会出现波动; 在测量次数达到 1 024~3 000 次时, PSNR 值较为稳定, 在测量次数增加的情况下, 三种方法的 PSNR 值上升趋势明显。

由图 7 可以观察到: 整体上压缩感知关联成像和伪逆关联成像的 PSNR 随着测量次数  $N$  的增大而增大; 伪逆关联成像的 PSNR 高于压缩感知关联成像和关联成像的 PSNR; 在采样次数较



(a) 原图 (b) 压缩感知关联成像重构图 (c) 加噪声后图像 (d) 形态学权重自适应去噪声图 (e) 形态学串联去噪

图 6 数字仿真—形态学权重自适应去噪声效果

Fig. 6 Digital simulation - morphological weight adaptive noise removal Effect

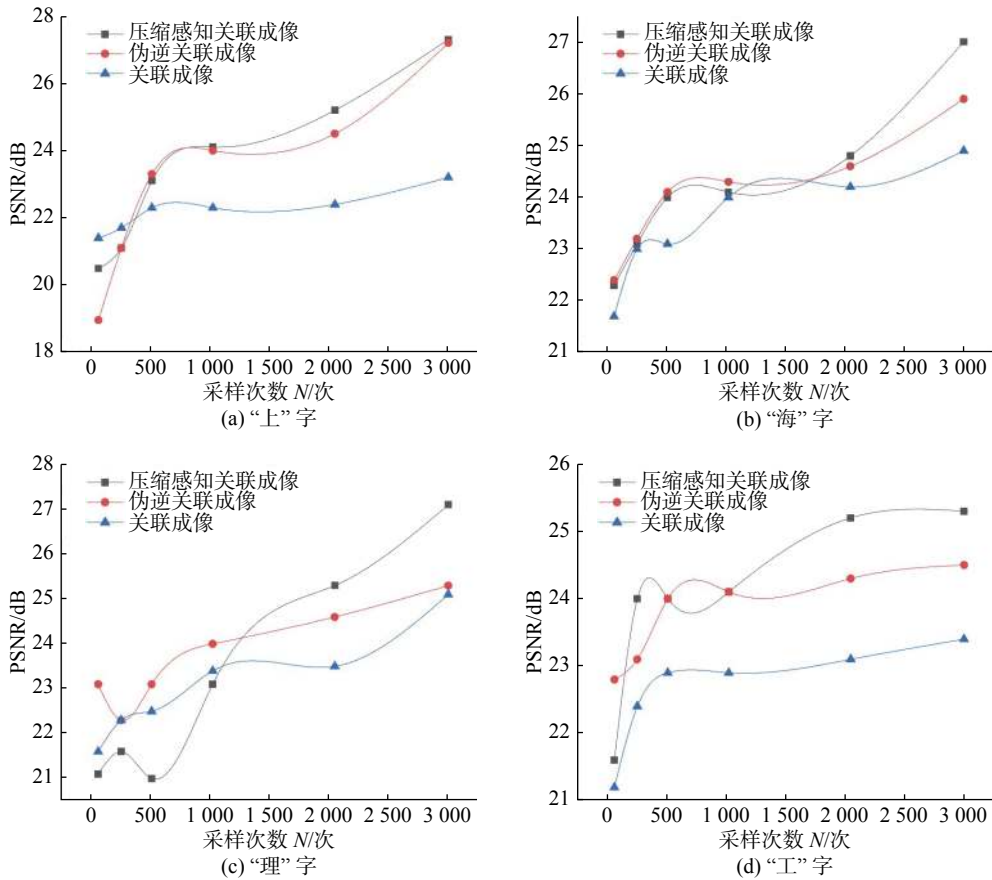


图 7 峰值信噪比分析

Fig. 7 PSNR analysis

低的区域，伪逆关联成像的效果较好，但随着采样次数的增加，压缩感知关联成像的 PSNR 值提升的幅度较大，在采样次数增加相同次数的情况下，压缩感知关联成像的 PSNR 值与伪逆关联成像的 PSNR 值相比，压缩感知关联成像的 PSNR 值更高。该数据结果与图 3、图 4、图 5 所示的视觉效果是一致的。

数据表明压缩感知关联成像和伪逆关联成像在高采样次数下比关联成像的成像效果要好。同时也可进一步说明压缩感知关联成像达到一定采样次数的时候，优化的结果会大幅提升，在此之前的成像效果并不佳。而伪逆关联成像则因为伪逆算法的优化，在低采样次数下能有较好的成像效果，但在采样次数较高的情况下，压缩感知关联成像与伪逆关联成像的成像效果并无明显区别。

为进一步比较压缩感知关联成像与伪逆关联成像的成像效果，我们将用两种方法重构图像，

并分析两者与原图的相似程度。

### 3.2 相关系数

相关系数(CC)反映两个变量之间的相互关系，即表明原图与重构图像之间相似的程度，相关系数(CC)的计算公式为

$$\begin{cases} E(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i \\ D(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - E(x))^2 \\ cov(x,y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - E(x))(y_i - E(y)) \\ CC = \frac{cov(x,y)}{\sqrt{D(x)}\sqrt{D(y)}} \end{cases} \quad (8)$$

式中： $x, y$  分别为图像中相邻 2 个像素点的像素值； $cov$  代表  $x$  与  $y$  之间的协方差。通过图 8 可以看出：对于“上”、“海”、“理”、“工”这四个目标，采样次数较低时，伪逆关联成像与

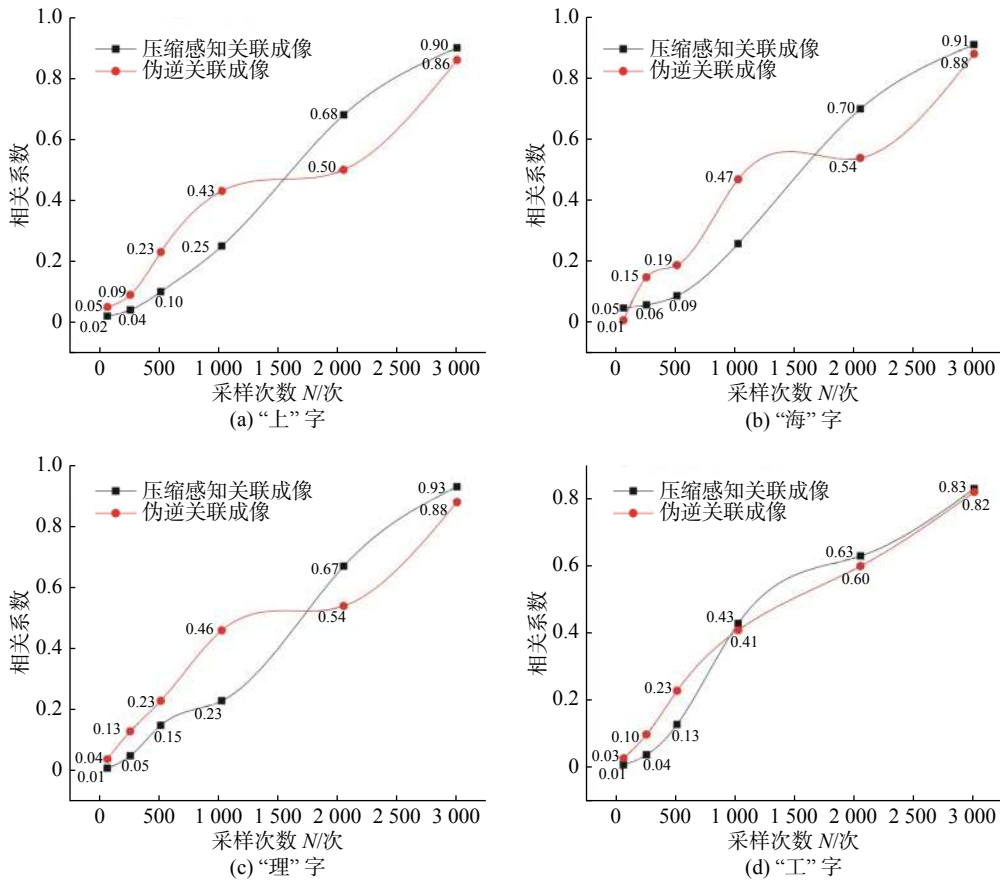


图 8 相关系数分析

Fig. 8 CC analysis

压缩感知关联成像相关系数都不高,表明与原图相差较大,且在采样次数较低的情况下,伪逆关联成像可以在较低的采样次数下重构出接近原图的轮廓;在采样次数提高的情况下,压缩感知关联成像与伪逆关联成像相比,压缩感知关联成像提高的幅度更大,并且最后结果表明,随着采样次数增加,压缩感知关联成像比伪逆关联成像更好,压缩感知关联成像的重构结果十分接近原图;再次证明在高采样区域压缩感知关联成像也拥有十分好的成像效果,并不亚于伪逆关联成像。

## 4 实验

本次实验为关联成像重构图像去除噪声的实验,对压缩感知关联成像实验重构的图像采用数字仿真的方式使用形态学权重自适应去除噪声。压缩感知关联成像实验装置为:激光二极管作为照明光源,使用的伸缩式镜头型号为尼康 AF-S

DX 55-200 mm f/4-5.6 G ED(68 mm\*79 mm)。使用供应灰点 POINTGREY 原装进口的 BFLY-PGE-50H5M 实验相机(29\*29\*30 mm),采集卡为 M2i.2030-exp,采用 DMD 空间光调制器,成像的目标物体是图像“字母 M”。实验结果如图 9(b)所示,通过图 9(b),可以发现:因为设备组件、实验环境等原因,在关联成像的过程中会产生噪声。对重构图像使用形态学权重自适应去除噪声的效果如图 9(c)所示。通过实验可以发现,形态学权重自适应可以有效去除关联成像实验中产生的噪声。

## 5 结论

本研究对比了关联成像、伪逆关联成像和压缩感知关联成像三种重构方法,通过开展详细理论分析、数字仿真以及实验来比较关联成像重构图像的效果。通过数字仿真,分别利用关联成

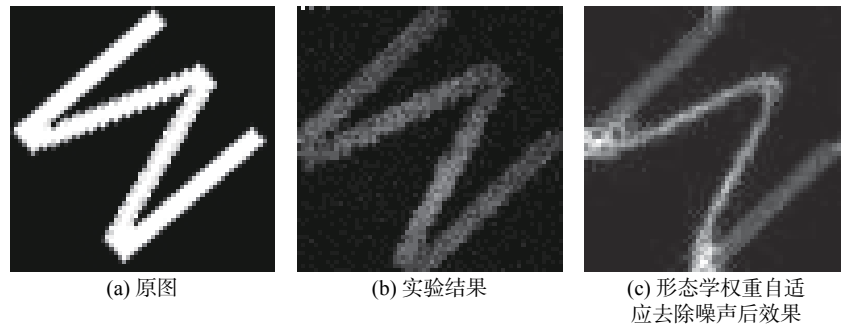


图 9 形态学权重自适应去除噪声实际效果

Fig. 9 Morphological weight adaptive noise removal experiment effect

像、伪逆关联成像和压缩感知关联成像对四个重构目标进行重构，通过对重构图像的视觉效果、峰值信噪比曲线图及相关系数曲线图分别对三种方法进行对比分析。仿真结果显示压缩感知关联成像在视觉上、峰值信噪比、相关系数上要优于关联成像。通过数字仿真及实验结果表明形态学权重自适应可以有效去除关联成像实验中产生的噪声。

#### 参考文献:

- [1] PAN Z L, ZHANG L H. Optical cryptography-based temporal ghost imaging with chaotic laser[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(16): 1289 – 1292.
- [2] 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.
- [3] SHIH Y H, PITTMAN T B, STREKALOV D V, et al. Two-photon ghost image and quantum cryptography[C]//Proceedings of quantum electronics and laser science conference. Baltimore, Maryland United States: OSA, 1995: 52 – 53.
- [4] KLYSHKO D N. Combine EPR and two-slit experiments: interference of advanced waves[J]. *Physics Letters A*, 1988, 132(6/7): 299 – 304.
- [5] 贺腾. 二阶关联成像与经典成像的比对研究 [J]. *价值工程*, 2016, 35(30): 118 – 121.
- [6] GATTI A, BRAMBILLA E, BACHE M, et al. Ghost imaging with thermal light: comparing entanglement and classical correlation[J]. *Physical Review Letters*, 2004, 93(9): 093602.
- [7] SHAPIRO J H. Computational ghost imaging[J]. *Physical Review A*, 2008, 78(6): 1050 – 2947.
- [8] BROMBERG Y, KATZ O, SILBERBERG Y. Ghost imaging with a single detector[J]. *Physical Review A*, 2009, 79(5): 053840.
- [9] ZHANG C, GUO S X, CAO J S, et al. Object reconstitution using pseudo-inverse for ghost imaging[J]. *Optics Express*, 2014, 22(24): 30063 – 30073.
- [10] GONG W L. High-resolution pseudo-inverse ghost imaging[J]. *Photonics Research*, 2015, 3(5): 234 – 237.
- [11] 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 – 683.
- [12] ZHAN W J, ZHANG L H, ZENG X, et al. Study on an optical encryption algorithm based on compressive ghost imaging and super-resolution reconstruction[J]. *Laser Physics*, 2018, 28(12): 125202.
- [13] 陈智鹏, 姜鹏, 贺婷婷. 应用于热光鬼成像的自适应形态学滤波器 [J]. *计算机工程与设计*, 2012, 33(11): 4402 – 4406.
- [14] AVCIBAS I, SANBUR B, SAYOOD K. Statistical evaluation of image quality measures[J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2002, 11(2): 206 – 213.
- [15] 褚江, 陈强, 杨曦晨. 全参考图像质量评价综述 [J]. *计算机应用研究*, 2014, 31(1): 13 – 22.
- [16] 张红伟, 郭树旭, 张驰. 关联成像目标重构的伪逆迭代降噪方法 [J]. *光子学报*, 2017, 42(2): 0210001.

(编辑: 张 磊)