

一种改进的基于压缩感知的差分关联成像方法

张国强 谢红梅 解一心
(西北工业大学电子信息学院 西安 710129)

摘 要 基于压缩感知的差分关联成像虽然能够以较少的采样次数高质量地恢复出物体的信息,但在图像重构过程中存在矩阵过大,占用计算机内存大,重构时间长的问题。为此提出了有数据预处理的改进压缩感知差分关联成像方案,首先鉴于光强涨落特性得到部分测量数据构造出初始字典 D_0 ,然后通过学习得到字典 D 作为传感矩阵,最后通过正交匹配追踪恢复出物体的信息。实测“单缝”实验数据成像结果表明,与传统的压缩感知差分关联成像相比,该方案以更少的测量数据恢复出高清晰的像,成像效率和质量都得到了提高,降低了对系统硬件的过高要求,缩短了图像重构时间,从而将有助于加快量子成像技术向实用化转化的步伐。

关键词 压缩感知,字典学习,关联成像

中图分类号 TN919.8 文献标识码 A

Improvement of Compressive Sensing Based Differential Correlated Imaging

ZHANG Guo-qiang XIE Hong-mei XIE Yi-xin

(School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

Abstract Compressive sensing based differential correlated imaging can reconstruct high quality object image using less number of samples than traditional correlated imaging method, but the former method still has the problem that large computation memory space and it need long image reconstruction time. To solve the problem, this paper proposed an improved differential compressive correlated imaging scheme using the fact that the fluctuations intensity of the optical field influences the contrast quality of the reconstructed image. The scheme can be described as following: First, the measurement data was preprocessed and only the measurement data that is higher than the average value were used to construct the initial dictionary by re-ordering the selected data and extend them to be vector. Then using the training sample, we got the learned initial dictionary D_0 as the sensing matrix, next with the learned D_0 , and using K-means singular value decomposition(K-SVD) algorithm we obtained the updated dictionary D and the corresponding sparse matrix. Finally, the object image information was gotten by orthogonal matching pursuit algorithm. Real experimental data of the object "single slot" and different imaging method were used, the imaging results show that the improved scheme can reconstruct high-definition images using less sample data amount (about 300 samplings) than the traditional compressive sensing based differential correlated imaging method (about thousands of samplings). Thus the new scheme greatly improves the imaging efficiency and image quality, reduces the excessive demands of the system storage hardware, and shortens the image reconstruction time. In addition, another object's image can be obtained by single optical path measuring provided that the parameters of optical source and distances unchanged, which can reduce the hardware complexity of correlation imaging. All this benefits will make the correlation imaging to be more practical for real applications.

Keywords Compressive sensing, Dictionary construction and learning, Correlated imaging

1 引言

关联成像 (Correlated Imaging), 又称为“鬼”成像 (Ghost Imaging, GI), 是 20 世纪 90 年代逐渐发展起来的一种新型成像方式, 由于其独特的成像方式, 成为关注和研究的热点。作为一种新的成像技术, 鬼成像在获得物体图像信息的过程中,

目标物体的检测和图像的重建过程是完全分离的。

最近几年, 基于热光源关联成像的研究已成为关联成像领域的前沿和热点, 使热光关联成像从理论到实验, 进而不断朝着实用化方向发展。2008 年 Shapiro^[1] 从理论上、2009 年 Bromberg 等人^[2] 从实验上提出了计算“鬼”成像 (Computational Ghost Imaging) 系统, 他们利用一个单像素探测器, 通

本文受西北工业大学种子基金、量子成像系统的开发与应用研究 (Z2013083), 陕西省自然科学基金项目 (2013JM8038), 航天科技创新基金项目 (CASC201102) 资助。

张国强 (1981—), 男, 硕士生, 主要研究方向为量子成像及其应用, E-mail: guoqiangwind@sohu.com; 谢红梅 (1972—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为电路与系统、并行图像算法设计, E-mail: xiehm@nwpu.edu.cn (通信作者); 解一心 (1976—), 男, 硕士生, 主要研究方向为电路与系统。

过特定的计算即能高分辨地呈现物体的像。2010年 Ferri 等人^[13]对传统 GI 二阶关联算法进行了改进和实验验证,提出了差分“鬼”成像方案(Differential Ghost Imaging, DGI),该方案可有效地提高热光源二阶强度关联成像的信噪比,可用于现实复杂物体的成像。2011年 Karmakar 等人^[3]首次应用太阳光作为光源,成功实现了热光关联成像实验。2012年 Sun 等人^[5]在 DGI 的基础上,提出归一化“鬼”成像(Normalized Ghost Imaging, NGI)方案,对于特定场景下的成像,SNR 比传统关联成像有较大幅度的提高,获得与 DGI 相当的性能。此外,罗开红等人^[6]通过理论与实验研究,提出一种热光关联成像方案(Correspondence Imaging, CI),这种方案以物臂中桶探测器的测量值的均值为判决条件,将探测值分为高于和低于均值的两部分,同时将对应对应的参考臂 CCD 探测器的测量值也分为两部分,仅利用物臂与参考臂的部分测量数据,即能完整地恢复出原始物体的正图像或负图像。随后, Wen Jianming^[7]对该方案做了进一步的理论分析,指出该方案的成像可见度能够突破传统关联成像理论极限,达到 100%,并讨论了实际场景中的应用。2009年 Ori Katz, Yaron Bromberg 等^[8]以及国内董小亮等^[4]将信息处理领域近年兴起并逐渐成熟的压缩感知理论(Compressive Sensing, Compressed Sensing, or Compressive Sampling, CS)引入到热光源关联成像系统,使得测量次数大大减少,成像效率明显提高。

然而,以上所介绍的传统的热光强度二阶关联成像系统,要想获得不错的成像质量,必须进行大量的采样,用远多于目标图像分辨率的探测点数来恢复物体图像,这就使其一方面成像速度不够快,另一方面对海量数据的存储、传输及处理的硬件设备要求极为严苛;而基于压缩感知理论的差分关联成像系统,虽然能以较少的采样数恢复出高质量的图像,但在图像重构过程中存在着占用计算机物理内存较大,重构时间过长的问題。

最近研究^[6]表明,通过挑选强度涨落较大的采样可以提高热光鬼成像的成像质量,并将其命名为“对应”像,光源的散斑强度在时间和空间上变化得越剧烈,测量得到的物体信息量就越大。

另一方面,20世纪80年代到90年代,机器学习受到人们关注,压缩感知在图像应用领域,也希望通过学习图像内容解决所设计的字典表示图像信号的问题,其学习方法基于这样的假设:复杂的自然结构特征能够直接从相应的数据中更准确地提取出来,而往往不是依靠和使用数学描述。这样做的好处在于训练得到的字典较好地适应现实的数据,进一步减少恢复算法的测量次数,降低了成像恢复时间。本文将利用按照一定条件提取的部分测量数据,结合学习字典在许多实际的信号处理应用中能够产生适应信号内容的结果的特点,进一步减少恢复算法的测量次数,降低了成像重构时间。

2 改进的基于热光源的差分压缩关联成像的基本原理

在热光源鬼成像的实验中,激光打到旋转的毛玻璃上,经散射后产生随机的散斑图样。如图1所示。

这些散斑被分束器分为两束,一束自由传播并由 CCD 探测器探测 $I_r(x, y)$;另一束光透过物体后,被放置于物体后的桶探测器 B_r 接收,其透射函数为 $T(x, y)$:

$$B_r = \int I_r(x, y) T(x, y) dx dy \quad (1)$$

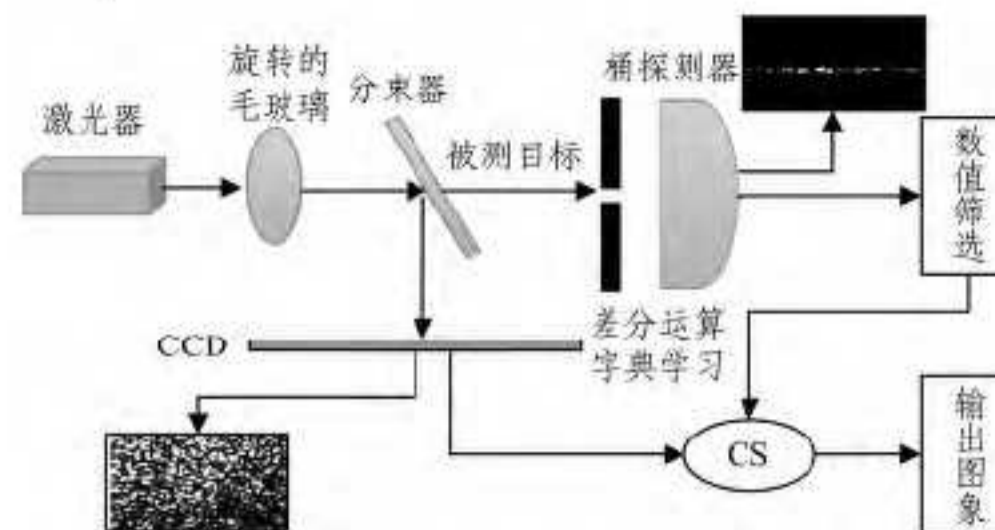


图1 改进的基于热光源的差分压缩关联成像原理图

物体与光源的距离和 CCD 探测器与光源的距离必须一致,才能保证透过物体的散斑和 CCD 探测器探测到的散斑图样相同。成像时,随着毛玻璃的转动,散斑图样发生变化,探测器的曝光时间必须远小于光源的相干时间,而两次采样的间隔必须远大于光源的相干时间,只有这样,才可以认为一次采样时间内的散斑图样是不变的,而两次测量得到的散斑是完全独立的。由于毛玻璃的转动,每次测量时散斑强度分布不同,通过物体的总光强就会发生相应的变化,因此每次测量都可以得到关于物体透过函数的部分信息。可以说,正是散斑强度的涨落使测量得到了物体的信息。散斑强度的涨落越剧烈,测量得到的物体信息量就越大。我们可以用散斑平均强度和散斑强度变化的方差来衡量散斑强度涨落的程度,散斑平均强度越小,强度变化的方差越大,则强度涨落越剧烈,成像对比度也越高。通过挑选强度涨落较大的采样可以提高热光鬼成像的成像质量。

为了重构目标函数,可将 M 次测量得到的桶探测器探测值 B_r 与 CCD 探测器探测值 $I_r(x, y)$ 进行关联运算:

$$T_{GI}(x, y) = \frac{1}{M} \sum_{r=1}^M (B_r - \langle B \rangle) I_r(x, y) \quad (2)$$

其中, $\langle * \rangle$ 为代表求算数平均值。

然而,光强空间二阶相关理论表明,热光辐射的最大相关值为 50%,所以图像的对比度调制最大值仅 33%。同时,由于存在背景光的干扰,GI 的信噪比也较小,要保证得到的图像有较高的信噪比,所需进行的测量次数 $M \gg N$ (N 为目标物体的奈奎斯特采样极限),从而造成关联成像系统的成像十分缓慢,对系统硬件和数据存储空间的要求甚为苛刻,极大地限制了热光关联成像的实际应用。

由压缩感知理论的分析可以得出,只要图像在某一变换域具有稀疏性,如二维离散余弦变换或小波变换,则通过空间强度随机涨落的高斯光场测量就可以在该域内用 CS 算法恢复。

物臂中桶探测器 M 次测量的平均值为 $\langle B \rangle$,按照式(2)的算法,将桶探测器对应的探测值 B_r 分成两部分,一部分高于 $\langle B \rangle$,记为 B_r^+ ;另一部分低于 $\langle B \rangle$,记为 B_r^- 。与之相应地,参考臂测量光场强度 $I_r(x, y)$ 分别为 $I_r^+(x, y)$ 和 $I_r^-(x, y)$ 。

M 次测量后,可将 B_r^+ 部分按照大小排列后按照一定规律不等间距抽取 L 个数值,并将对应的每个 CCD 阵列的测量值 $I_r(x, y)$ 按行拉直,得到行向量 ϕ_j ,并将 L 个行向量逐列排成矩阵 Φ 作为测量矩阵,该测量矩阵大小为 $L \times n^2$,其一行代表一次测量中 CCD 探测器获取的所有像素点光强度值;一列代表 CCD 探测平面的某一个像素点在 L 次测量中的 L 个测量光强度值。另一方面,将桶探测器的 L 个测量数据 B_r 与 CCD 探测器相对应的测量数据 $I_r(x, y)$ 经过差分运算得到数

据 y_r :

$$y_r = B_r - \frac{\langle B_r \rangle}{\langle E_r \rangle} E_r \quad (3)$$

其中, E_r 是 CCD 探测器测量数据 $I_r(x, y)$ 分布平面各点强度值之和, 即:

$$E_r = \sum I_r(x, y) \quad (4)$$

将 y_r 排为列向量 y , 设 N 维 (N 等于 CCD 阵列的阵元数) 未知图像为 x , 则量子成像数据获取过程可表示为一个如式(5)所示的线性系统:

$$y = \Phi \cdot x \quad (5)$$

压缩感知理论指出, 若图像 x 满足“稀疏性”, 即存在某表示基 Ψ , 使得 $x = \Psi \cdot \alpha$, 且 α 的非零(或几乎为零)的系数个数 $K \ll N$; 进一步, 若矩阵 Φ 满足可重构条件, 则可通过式(6)的最优化过程获得高质量的图像。

$$x_s = \arg \min \{ \|y - \Phi \cdot \Psi \cdot \alpha\|_2^2 + \lambda \|\alpha\|_1 \} \quad (6)$$

其中, x_s 即为稀疏重构图像, λ 为控制稀疏约束强度的参数。

在实际应用计算中, 由于测量矩阵大小与 CCD 阵列的阵元数的平方成正比, 为了占用较少物理内存, 对 CCD 阵列的阵元数有严格的限制, 或将大图像进行分块, 然而, 分块后所恢复图像的负面效应明显。为了解决这个问题, 我们可以构造传感矩阵 D_0 , $D_0 = \Phi \cdot \Psi_0$, 其中 Ψ_0 为离散余弦系数。把 D_0 作为初始字典, 利用训练样本, 以 K-SVD 算法进行字典更新, 得到学习字典 D 。

则式(5)就可表示为:

$$y = D \cdot \alpha \quad (7)$$

然后依据 $D = \Phi \cdot \Psi$, 可得到稀疏基矩阵 Ψ , 在以后成像实验中, 如光源和物体距离不发生变化, 可依据矩阵 Ψ , 提取 L 个数组, 利用式(6)的最优化过程即可获得高质量的图像。

3 实验结果分析

通过目标为“单缝”的物体图像来验证基于压缩感知重构热光源鬼成像方案, CCD 采样尺寸为 1392×1040 像素, 采样次数 M 为 5000, 抽取 B_r^+ 数值 L 为 300 次。

首先, 利用传统 GI 二阶关联算法进行图像重构, 如图 2(b) 所示, 虽然采样次数多达 5000, 但物体分布信息几乎被背景噪声淹没, 难以分辨。

然后, 求得物臂中桶探测器 5000 次测量的平均值为 $\langle B \rangle$, 求得高于平均值的 B_r^+ 为 2816 次, 按照计算所得到的规律不等间距抽取 300 个数值后, 相对应的 $I_r(x, y)$ 利用 2D-DCT 图像变换算法构造传感矩阵 D_0 , 然后利用正交匹配追踪(Orthogonal Matching Pursuit, OMP) 算法构造原始图像, 如图 2(c) 所示。结果表明, 虽然采样次数为 300, 远远少于 GI 二阶关联算法采样次数, 但图像恢复质量远远好于 GI 方案。

利用图 2(a) 目标原始数据, 以 D_0 为初始字典进行字典更新学习, 得到矩阵 D , 然后利用 OMP 算法构造原始图像, 如图 2(d) 所示。结果表明, 在数据不变情况下, 通过优化传感矩阵 D , 成像效果明显提高。

最后, 在光源近似认为不变的情况下, 不改变毛玻璃的旋转速度, 不改变物体与光源的距离, 测量次数降为 2000, 利用同样方法抽取数值 L 为 300 次, 利用学习得到的稀疏基矩阵 Ψ , 通过 OMP 算法构造原始图像, 如图 2(e) 所示。显示结果表明, 在光源分布近似不变的情况下, 用学习得到的稀疏基矩阵 Ψ , 虽然减少了总的采样次数, 仍然能恢复出物体的图像。

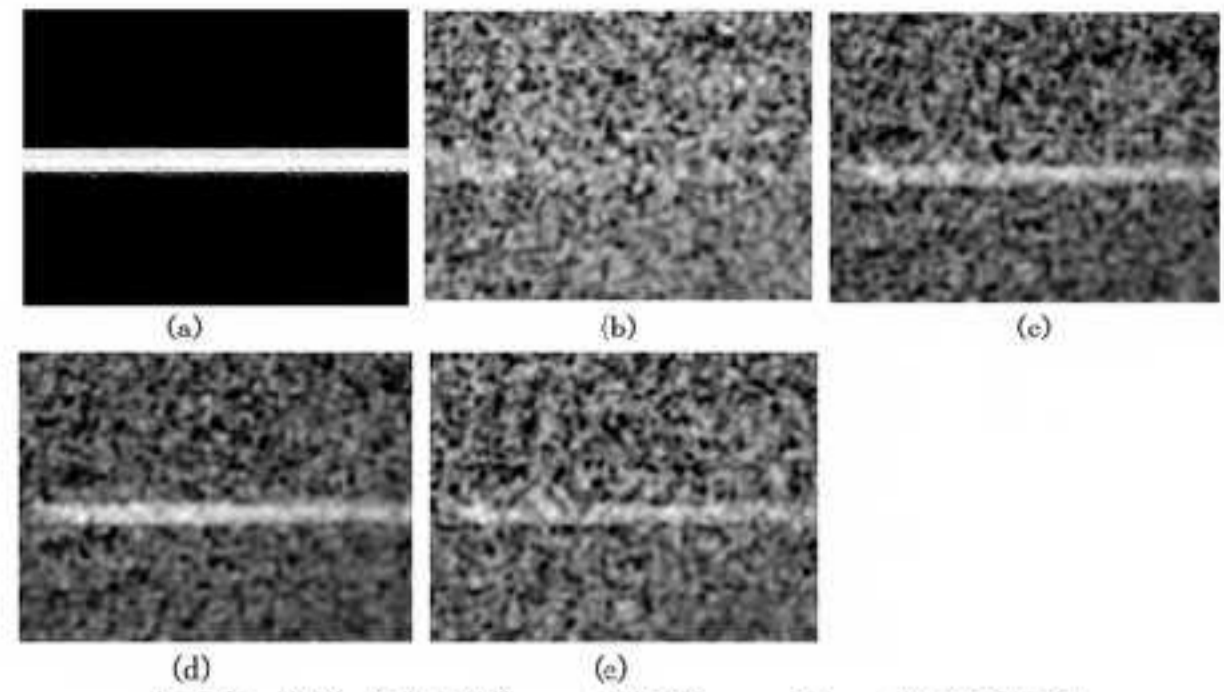


图 2 “单缝”的 GI 重构图像比对照图
(a) 为目标“单缝”物体图像; (b) 为采样 5000 次 GI 的成像效果; (c) 为采样 300 次, 传感矩阵为 D_0 时的成像效果; (d) 为采样 300 次, 传感矩阵为 D 时的成像效果; (e) 为采样 2000 次, 抽取采样 300 次, 利用将学习得到的稀疏基矩阵 Ψ 时的成像效果

图 2 “单缝”的 GI 重构图像比对照图

结束语 本文提出了通过数据处理产生强度涨落更剧烈的光场进行鬼成像来提高成像质量, 并通过与压缩感知相结合, 利用字典学习构造传感矩阵 D , 学习得到的稀疏基矩阵 Ψ 应用于差分关联成像。实验结果表明, 本文提出的方案不仅能够有效抑制噪声, 而且减少了采样的次数, 缩短了图像重构的时间, 对系统硬件要求不再那么苛刻, 成像质量也有了大幅度的提高, 这将有助于加快量子成像技术向实用化转化的步伐。

参考文献

- [1] Shapiro J H. Computational ghost imaging [J]. Phys Rev A, 2008, 78(6): 061802(R)
- [2] Bromberg Y, Katz O, Silberberg Y. Ghost imaging with a single detector [J]. Phys Rev A, 2009, 79(5): 053840
- [3] Karmakar S, Zhai Y H, Chen H. The first ghost image using sun as a light source [C] // Quantum Electronics and Laser Science Conference, Baltimore, 2011: 1-2
- [4] 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
- [5] Sun B Q, Welsh S S, Edgar M P, et al. Normalized ghost imaging [J]. Opt Express, 2012, 20(15): 16892-16901
- [6] Luo K H, Huang B Q, Zheng W M, et al. Nonlocal Imaging by Conditional Averaging of Random Reference Measurements [J]. Chinese Phys Lett, 2012, 29(7): 074216
- [7] Wen J M. Forming positive-negative images using conditioned partial measurements from reference arm in ghost imaging [J]. Journal Opt Soc Am A, 2012, 29(9): 1906-1911
- [8] Candès E J, Romberg J, Tao T. Robust uncertainty principles: exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information [J]. IEEE Trans Inform Theory, 2006, 52(2): 489-509
- [9] Donoho D L. Compressed sensing [J]. IEEE Trans Inform Theory, 2006, 52(4): 1289-1306
- [10] Baraniuk R G. Compressive Sensing [J]. IEEE Signal Processing Mag, 2007, 24(4): 118-121
- [11] Candès E J, Wakin M B. An introduction to compressive sampling [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2008, 25(2): 21-30
- [12] Katz O, Bromberg Y, Silberberg Y. Compressive ghost imaging [J]. Appl Phys Lett, 2009, 95(13): 131110
- [13] Ferri F, Magatti D, Lugiato L A, et al. Differential Ghost Imaging [J]. Phys Rev Lett, 2010, 104(25): 253603