

# 基于数字微镜器件的压缩感知关联成像研究

陆明海 沈 夏\* 韩申生

(中国科学院上海光学精密机械研究所量子光学重点实验室, 上海 201800)

**摘要** 将数字微镜器件(DMD)应用于压缩感知(CS)关联成像,在该成像方案中,只需用无空间分辨能力的桶探测器,并结合相应的算法就能得到物体的像;将此成像方案应用于多光谱成像,仅需用线列探测器就能得到物体多光谱像,简化了多光谱成像探测的光电记录过程。通过对关联成像和 CS 理论的介绍阐明了成像原理。在实验平台上搭建演示装置,分别用强度关联算法和 CS 算法计算得到物体像,通过比较表明 CS 算法提取信息的效率更高;且实验表明在透镜口径足够大时,成像系统的分辨率由 DMD 面元大小决定。在原成像装置上,对桶探测器接收的光强信号进行谱分辨测量,线列探测器记录各光谱信号,利用 CS 关联成像方法得到物体多光谱像。

**关键词** 成像系统;关联成像;压缩感知;多光谱成像;数字微镜器件

中图分类号 O438 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201131.0711002

## Ghost Imaging via Compressive Sampling Based on Digital Micromirror Device

Lu Minghai Shen Xia Han Shensheng

(Key Laboratory for Quantum Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

**Abstract** A digital micromirror device (DMD) is introduced to the ghost imaging via compressive sampling (CS). In this scheme, the image of object can be obtained using the bucket detector which has no spatial resolution. If the imaging scheme is applied to the multi-spectral imaging, multi-spectral images of object can be obtained using a linear array detector, which reduces the complexity of detector in imaging. The principle of ghost imaging is clarified with the correlated imaging the theory of CS. According to the imaging principle, the experimental demonstration device is assembled, and the object's image is achieved accurately in the experiment. Ghost imaging and ghost imaging CS are compared to show that the latter has a better performance. Meanwhile, according to the experimental results, the resolution of the imaging system is decided by the size of unit on the DMD when the aperture of lens is big enough. Based on this imaging system, the multi-spectral imaging is carried out. The intensities at different wavelengths are recorded by the linear array detector, and the multi-spectral images of object are achieved in the experiment.

**Key words** imaging system; ghost imaging; compressive sampling; multi-spectral imaging; digital micromirror device

**OCIS codes** 110.0110; 110.1758; 110.3010; 110.4234

## 1 引 言

关联成像,又称为鬼成像,是近 10 年发展起来的一种新型的成像技术<sup>[1~23]</sup>。与传统的成像方式不同,它实现了物体的非局域成像。所谓非局域成像是指通过一定的手段,使在不包含物体的光路上呈现其像。关联成像中有探测臂和参考臂两条光

路,探测臂在探测物体信号的同时需要实时地在参考臂上探测光源光场的强度分布信息。2008 年,Shapiro<sup>[2]</sup>在理论上分析了可以利用空间光调制器(SLM)来预置参考臂上的光场,实现单臂鬼成像的方案,从而省去了参考臂对光场的实时测量,且只用单像素的探测器就能对物体进行成像。2009 年,

收稿日期: 2011-01-20; 收到修改稿日期: 2011-03-21

作者简介: 陆明海(1985—),男,硕士研究生,主要从事关联成像方面的研究。E-mail: lugui2009@163.com

导师简介: 韩申生(1960—),男,博士,研究员,主要从事新概念 X 光成像技术、量子成像和压缩感知关联成像技术等方面的研究。E-mail: sshan@mail.shcnc.ac.cn

\* 通信联系人。E-mail: shenxia@siom.ac.cn

Bromber 等<sup>[3]</sup>根据 Shapiro 的单臂鬼成像方案,在实验上成功地得到了物体的像。与他们不同的是,本文利用数字微镜器件(DMD)预置参考臂的光场,并结合关联成像和压缩感知(CS)理论,利用单像素的桶探测器得到物体的像。此外,更重要的是将这种成像方案应用于多光谱成像中,仅需用一维的阵列探测器就能得到物体的多光谱像。

本文介绍了压缩感知关联成像的成像原理。将 DMD 应用到实验中,设计搭建了演示装置,利用 CS 成像的方案对物体进行成像,并分析了成像系统的分辨本领。此外,在原有的成像装置的基础上,对物体信号进行谱分析测量,利用相同的成像原理得到了物体的多光谱像。

## 2 压缩感知关联成像原理

关联成像起源于双光子的纠缠特性<sup>[4,5]</sup>,现在国内外的专家学者已经从理论上<sup>[6-9]</sup>证实了应用热光源也能实现关联成像,并且在实验上用赝热光源<sup>[10-16]</sup>和真热光源<sup>[17,18]</sup>都实现了热光源的关联成像。同时,也用热光源实现了对应的鬼干涉<sup>[12,19]</sup>以及亚波长干涉<sup>[20,21]</sup>。与传统的直接成像不同,关联成像通过计算来得到物体的像,其成像原理如图 1 所示。

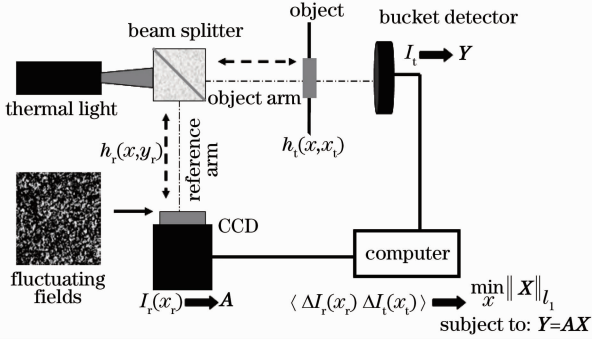


图 1 关联成像和压缩感知关联成像的原理图

Fig. 1 Schematic of ghost imaging and ghost imaging via compressive sampling

在成像光路中,分束棱镜将整个系统分成两条光路——探测臂和参考臂,探测臂是包含物体的光路,在探测面上只需用点探测器记录某一固定位置的光强或用桶探测器探测总光强;另一光路称为参考臂,其探测面上一般由 CCD 探测光场的光强分布。成像光路需满足的条件是,物体面上的光场与 CCD 面的探测光场具有关联性。若成像光源为空间完全非相干光,通过多次独立采样,可根据关联算法得到两臂光强涨落关联的表达式<sup>[7,8,22]</sup>:

$$\langle \Delta I_r(x_r) \Delta I_t(x_t) \rangle = \left| \int dx \int G^{(1,1)}(x, x') h_r^*(x', x_r) h_t(x, x_t) dx' \right|^2 = \left| \int h_r^*(x, x_r) h_t(x, x_t) dx \right|^2 \propto |t|^2, \quad (1)$$

式中  $G^{(1,1)}(x, x')$  表示光源的一阶关联函数,对于空间完全非相干光有  $G^{(1,1)}(x, x') = I(x)\delta(x - x')$ ;  $h_t(x, x_t)$  是探测臂的脉冲响应函数,该函数中包含了物体信息;  $h_r^*(x', x_r)$  是参考臂脉冲响应函数的共轭;  $|t|^2$  可记为  $T$ , 表示物体的透射函数,即物体的像。关联成像是从强度的涨落中来提取信息,因此成像所用的光场是空间强度涨落的光场,并由参考臂上的 CCD 测量到涨落光场的空间强度分布。

CS 理论<sup>[24-28]</sup>是关于信号采样和数据处理的一门新兴的理论,它指出在一定的条件下,用远低于 Nyquist 采样定理要求的采样次数对信号进行采样时,也能很好地恢复出原始信号<sup>[25]</sup>。CS 理论的核心内容有两点<sup>[26,27]</sup>: 1) 目标信号的稀疏表达, 2) 测量的非相干性。目标信号的稀疏表达指,将信号在表达基  $\Psi$  下展开成  $f = \sum_{i=1}^n x_i \phi_i$ , 其变换系数  $x_i$  是稀疏的,即只有相对较少的系数有较大的数值,大部分系数的值都接近于或等于 0。测量的非相干性则是指,用测量基  $\Phi$  去探测物体,其测量值为内积运算  $y_i = \langle f, \phi_i \rangle$ 。该测量基与信号稀疏的表达基应该是非相干的。实际应用中,可以使用类噪声的随机信号作为测量基来满足这一非相干性<sup>[27,28]</sup>。满足以上两个条件,构建信号探测过程,假设目标信号为  $f$ , 其稀疏系数为  $X$ , 测量值为  $Y$ , 则可以构造出以下最小  $l_1$  范数规范凸规划问题:

$$\min_x \|X\|_{l_1} \text{ subject to } Y = \Phi f = \Phi \Psi X = AX. \quad (2)$$

CS 理论中通过相应的构造算法寻找信号的稀疏解,其中  $\|X\|_{l_1} = \sum_i |x_i|$ 。

在关联成像中,可以根据光场的关联性性质并利用相应的关联算法计算出物体的像,也可以应用 CS 算法来得到物体的像,并将 CS 和关联成像相结合的成像方法称为压缩感知关联成像<sup>[29-31]</sup>。关联成像的信号采样模式与 CS 理论相吻合。关联成像参考臂光路的光场是空间强度随机涨落的光场,可作为测量基去探测目标物体,由 CCD 探测到这一涨落光场的强度分布函数为  $I_j(x, y)$ , 若取空间域稀疏的物体,则从参考臂中就得到了  $A$  矩阵;探测臂中的桶探测器测量的总光强值记为  $B_j$ , 该光路提供了

对应的测量值  $Y$ , 那么在关联成像中也可构造以下凸规划问题来得出物体的像:

$$T_{CS} = T; \min \|T(x, y)\|_{l_1} \text{ subject to} \\ \int dx \int I_j(x, y) T(x, y) dy = B_j, j = 1, \dots, m, (3)$$

式中  $T$  表示物体的透射函数,  $m$  是测量次数, 表明有  $m$  个独立非相干的涨落场去探测目标物体。对于空间域稀疏的  $n \times n$  的图像信号, 将其当作  $n^2 \times 1$  的列向量  $\mathbf{X}$ 。每一帧涨落场则可作为  $1 \times n^2$  的行向量, 通过  $m$  次独立测量, 通常情况下  $m \ll n^2$ , 将这  $m$  个行向量作为矩阵的每一行堆积成大小为  $m \times n^2$  的  $\mathbf{A}$  矩阵, 并与  $m \times 1$  的测量值  $\mathbf{Y}$  构成非线性方程组, 使用相应的 CS 重构算法求得稀疏的列向量  $\mathbf{X}$ , 并反演成所求的  $n \times n$  的图像。

### 3 实验过程及结果

成像方案中用到了一个重要的器件是 DMD<sup>[32]</sup>。将均匀光场投射到 DMD 面上, 受到反射微镜面元的调制, 表面将产生空间强度涨落的光场, 该强度涨落是 0~1 分布的二值随机涨落。DMD 预置的调制信号可作为参考臂的空间光强分布信息, 从而实现了单臂的压缩感知关联成像。在实验平台上搭建了成像演示装置, 对该成像方案的可行性以及成像系统的分辨本领做了研究, 此外, 通过对物体后的光强进行谱分析测量, 将该成像方案应用于多光谱成像。

#### 3.1 成像实验

将 DMD 器件应用于压缩感知关联成像中, 实验光路如图 2 所示。

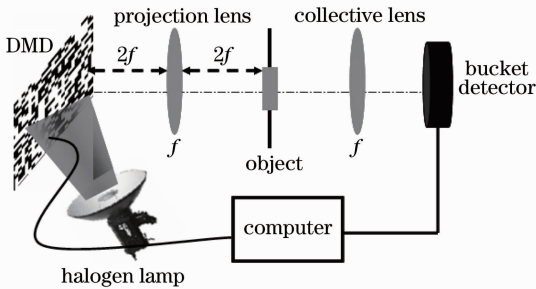


图 2 基于 DMD 的压缩感知关联成像实验光路图  
Fig. 2 Schematic of ghost imaging via compressive sampling based on DMD

实验系统可看作是一个光学计算系统。它主要由以下几个部分组成: 待测物体、一块 DMD 芯片、两片透镜、一个桶探测器和一个 150 W 的卤素灯光源。卤素灯光源发出空间强度均匀分布的白光, 投射到 DMD 面上, 经 DMD 反射镜片调制后在其面上

形成空间强度二值随机分布的涨落光场。透镜 1 作为 DMD 的投影透镜, 同时将 DMD 面上的光场成像到物体面上。物体是空间域稀疏的透射型物体。透镜 2 为收集透镜, 将物体后的透射光强聚集到桶探测器上, 桶探测器无空间分辨能力, 只记录物体透射光的总光强。计算机输出 DMD 的控制信号, 同时接收桶探测器输入的光强值。

计算机中先预存 1000 frame 的 DMD 控制信号, 即表明实验的测量次数为 1000 次。计算机输出 1 frame DMD 的控制信号, 就对物体测量一次, 测量结果被桶探测器记录。根据 CS 理论, 用探测值和已知的测量基来构造最小  $l_1$  规范凸规划问题, 并用 CS 的重构算法计算出物体的像, 实验中所用的重构算法为 GPSR 算法<sup>[33]</sup>。选取了两个透射型的物体进行实验, 如图 3(a1), (a2) 所示, 这是用 CCD 记录  $2f-2f$  成像系统所得的物体像, CCD 的像素大小为  $4.65 \mu\text{m}$ 。图 3(b1), (b2) 是基于 CS 成像原理, 由 CS 算法所得的像, 实验中 DMD 的微镜面元大小为  $54.8 \mu\text{m}$ 。图 3(c1), (c2) 是用去噪的关联算法<sup>[23]</sup>所得的像。

实验上用两种不同的算法都得到了物体的像。比较图 3(b1), (b2) 和图 3(c1), (c2) 的成像结果, 可以明显地看到, 在相同的采样次数下, 相比于 CS 算法, 用关联算法计算出来的物体像细节模糊, 质量较差。这是因为 CS 理论在提取物体信息时应用了物体的稀疏先验信息, 在测量次数较少的情况下, 也能较好地恢复出目标图像信号<sup>[34]</sup>。

#### 3.2 成像系统的分辨能力实验

分辨率是考察成像系统的一个重要指标。在本成像系统中, 只用无空间分辨能力的桶探测器就能够得出空间物体的像。实验证明了成像系统的分辨本领是由投影成像透镜的分辨率和 DMD 面元的大小共同决定的, 在投影成像透镜对 DMD 面元能够分辨的前提下, 此成像系统的分辨本领由 DMD 面元大小决定。实验中投影成像透镜的口径大小保持不变, 且透镜能够分辨出 DMD 面元。实验物体为两组双缝, 如图 4 所示, 双缝的缝宽都为  $40 \mu\text{m}$ , 左双缝的缝间距为  $100 \mu\text{m}$ , 右双缝的缝间距为  $80 \mu\text{m}$ 。采用了 3 个 DMD 微镜的面元大小, 分别是合并了 64, 16, 4 个单位微镜面元组成的大的正方微镜面元, 并记为 pin8, pin4 和 pin2, 那么 DMD 微镜的面元大小分别为  $109.6, 54.8$  和  $27.4 \mu\text{m}$ 。测量次数都取为 1000 次, 实验结果如图 4(b)~(d) 所示。

从实验结果来看, pin8 的 DMD 完全没有分辨

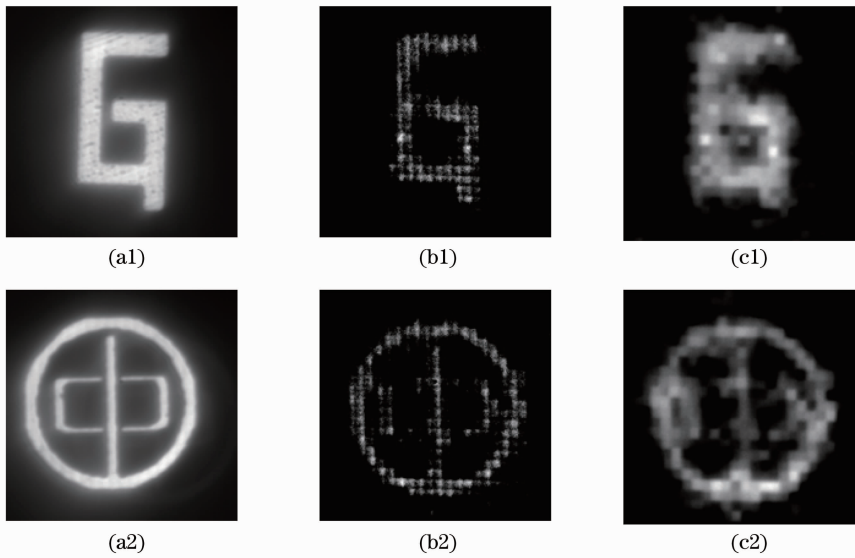


图 3 实验结果。(a1),(a2)原物体;(b1),(b2)CS 所得的图像;(c1),(c2)关联算法所得的图像

Fig. 3 Experimental results. (a1),(a2) Original objects; (b1),(b2) images achieved from ghost imaging based on CS; (c1),(c2) images achieved from ghost imaging

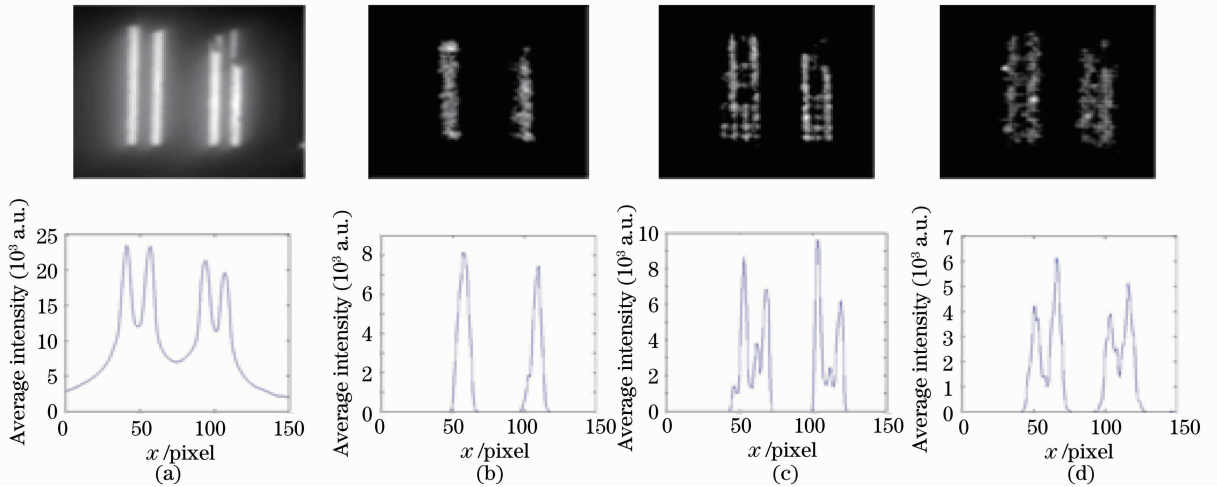


图 4 分辨率实验的结果。(a)原物体;(b) pin8 所得的结果;(c) pin4 所得的结果;(d) pin2 所得的结果

Fig. 4 Results of the resolution experiment. (a) original objects; (b) result achieved from pin8; (c) result achieved from pin4; (d) result achieved from pin2

出双缝,而 pin4 和 pin2 的 DMD 按照预期都分辨出了双缝。因而实验上可得出,在投影成像透镜能够分辨出 DMD 面元的前提下,成像系统的分辨率是由 DMD 芯片上的微镜面元的大小所决定的。此外,由该成像系统所得的图像,以 DMD 的微镜面元的大小作为图片像素大小。

### 3.3 多光谱成像实验

在关联成像中,一般都是将单模激光照在旋转的毛玻璃上产生所需的涨落光场<sup>[11~16]</sup>,所得到的像不含物体的光谱信息。而在基于 DMD 器件的压缩感知关联成像中,DMD 调制的是非单色的白光。因此在该成像系统中,在目标物体后搭建光栅色散

系统对物体信号进行谱分辨测量,可以实现多光谱成像。基于相同的成像原理,对光路稍加修改。不同于前面的 DMD 调制光源信号,这里用 DMD 来调制目标物体信号,这种成像方式也适用于物体的自发辐射成像。多光谱成像实验的光路图如图 5 所示。

实验中将目标物体成像到 DMD 面上,并用 DMD 器件来调制物体信号。调制后的光信号经过滤波和准直系统后照射在光栅上,经光栅分光后由线列探测器记录各窄带光谱波段的光强值。实验所用物体是一块透射式物体贴上渐变滤波片所组成的色散物体,如图 5 所示。此块渐变滤波片将透射物体分



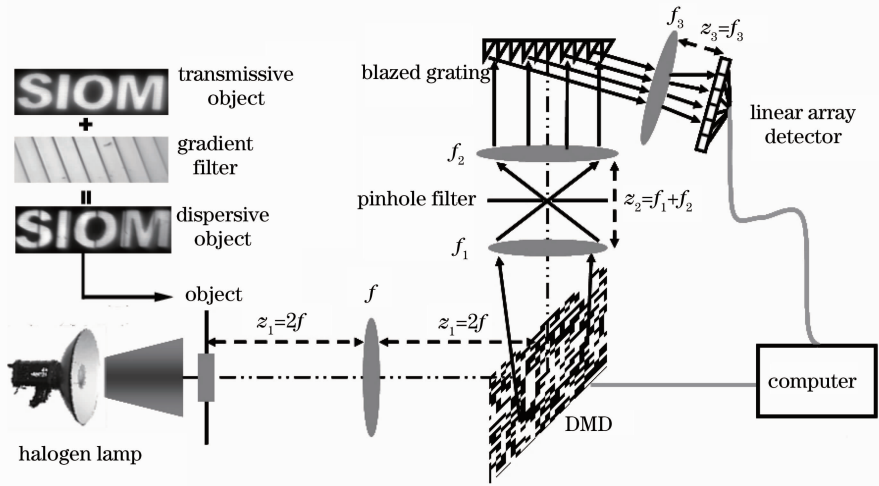


图5 基于 DMD 的 CS 多光谱关联成像光路图

Fig. 5 Optical path of multi-spectral ghost imaging via CS based on DMD

成 7 个子块,每个子块透射滤过不同波长的窄带光谱,对应的波长分别为 655,660,665,670, 680,685 和 690 nm。光栅色散系统中的光栅为 1200 line/mm 的闪耀光栅。阵列探测器记录各光谱波段的光强值,每一帧探测所记录的实验结果如图 6 所示,与预期结果相吻合,光束经过分光系统后分成 7 个不同波段的光谱,分别对应色散物体不同部分的透射光谱,图中曲线表示各波段的能量值。根据压缩感知关联成像的原理,计算机输出的 DMD 控制信号作为参考臂信号,测量次数为 2000 次,采集实验数据,并应用相同的 CS 重构算法计算出物体的像,计算结果如图 7 所示。图 7 中(a)~(g)是色散物体的相应光谱波段的像,分别对应着物体相应部分。图 7(h)给出了物体的完整像。

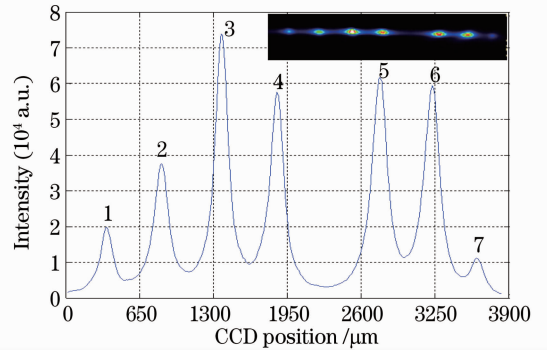


图6 阵列探测器的每一帧测量结果

Fig. 6 Measurement results of array detector per frame 空间维的信息,这对探测提出了很高的要求。而本文的多光谱成像系统只需用一维的阵列探测器记录光谱维的信息,不需要记录物体的空间位置信息,这样就减轻了对探测器的要求,同时也提高了信号的提取效率。此外,DMD 器件的反射波段很宽,能在对应的各个波段得到物体的像。

传统的多光谱成像不但需要记录物体光谱维信息,而且通常需要扫描探测物体在各光谱波段下的

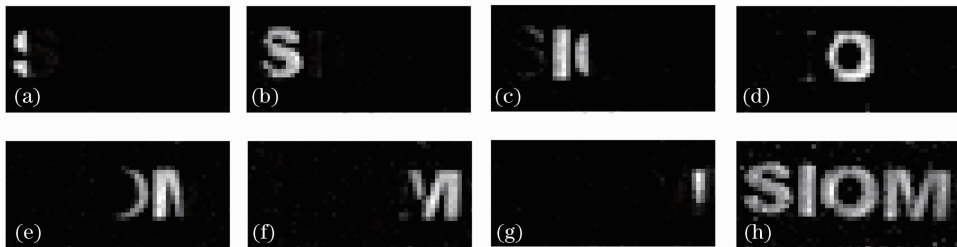


图7 (a)~(g) CS 算法所得的物体各光谱波段的像,(h)物体的完整像

Fig. 7 (a)~(g) images of the object's different segments achieved from ghost imaging based on CS, (h) whole image of object

## 4 结 论

将 DMD 应用于压缩感知关联成像,实验上成

功地得到了物体的像。在成像系统中,DMD 用预置的调制信号对均匀光场进行调制,省去了压缩感

知关联成像中的参考臂光路,实现了用桶探测器进行成像的实验方案。通过进一步的实验,将这种成像方式应用于多光谱成像,简化了成像光路,提高了探测效率。实验中选用的是空间域稀疏的物体,但本成像方法是一种普适的成像方法,在对其它类型的物体进行成像时,可以利用与之相对应的稀疏表达基来构建凸规划问题。此外,该成像方式适用于红外成像。目前,高灵敏度的红外面阵探测器很难制造。若将该成像方式应用于红外成像,通过DMD器件对红外光源进行调制,只需应用桶探测器就能得到高质量的红外图像。

## 参 考 文 献

- 1 M. D'Angelo, Y. H. Shih. Quantum imaging[J]. *Laser Phys. Lett.*, 2005, **2**(12): 567~596
- 2 J. H. Shapiro. Computational ghost imaging[J]. *Phys. Rev. A*, 2008, **78**(6): 1802~1806
- 3 Y. Bromberg, O. Katz, Y. Silberberg. Ghost imaging with a single detector[J]. *Phys. Rev. A*, 2009, **79**(5): 3840~3844
- 4 T. B. Pitman, Y. H. Shih, D. V. Strekalov *et al.*. Optical imaging by means of two-photo quantum entanglement[J]. *Phys. Rev. A*, 1995, **52**(5): R3429~R3432
- 5 A. F. Abouraddy, B. E. A. Saleh, A. V. Sergienka *et al.*. Entangled-photon fourier optics[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, **19**(5): 1174~1184
- 6 A. Gatti, E. Brambilla, M. Bache *et al.*. Correlated imaging, quantum and classical[J]. *Phys. Rev. A*, 2004, **70**(1): 013802
- 7 A. Gatti, E. Brambilla, M. Bache *et al.*. Ghost imaging with thermal light: comparing entanglement and classical correlation[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, **93**(9): 3602~3606
- 8 Jing Cheng, Shensheng Han. Incoherent coincidence imaging and its applicability in X-ray diffraction[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, **92**(9): 093903~093906
- 9 Dezhong Cao, Jun Xiong, Kaige Wang. Geometrical optics in correlated imaging systems[J]. *Phys. Rev. A*, 2005, **71**(1): 013801
- 10 R. S. Bennink, S. J. Bentley, R. W. Boyd. "Two-photon" coincidence imaging with a classical source[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, **89**(11): 113601
- 11 A. Valencia, G. Scarcelli, M. D'Angelo *et al.*. Two-photon imaging with thermal light[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, **94**(6): 063601
- 12 F. Ferri, D. Magatti, A. Gatti *et al.*. High-resolution ghost image and ghost diffraction experiments with thermal light[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, **94**(18): 183602
- 13 Minghui Zhang, Qing Wei, Xia Shen *et al.*. Lensless Fourier-transform ghost imaging with classical incoherent light[J]. *Phys. Rev. A*, 2007, **75**(2): 021803
- 14 Shen Xia, Zhang Minghui, Liu Honglin *et al.*. Research on the pulsed pseudo-thermal light [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 2893~2898  
沈 夏, 张明辉, 刘红林 等. 脉冲式赝热光源的实验研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 2893~2898
- 15 Zhang Minghui, Wei Qing, Shen Xia *et al.*. Statistical optics based numerical modeling of ghost imaging and its experimental approval[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(10): 1858~1866  
张明辉, 魏 青, 沈 夏 等. 基于统计光学的无透镜鬼成像数值模拟和实验验证[J]. *光学学报*, 2007, **27**(10): 1858~1866
- 16 He Shibei, Shen Xia, Wang Hui *et al.*. Ghost imaging without beamsplitter in thermal optical field[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(11): 3332~3335  
贺拾贝, 沈 夏, 王 慧 等. 热光场无分束器非局域成像研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(11): 3332~3335
- 17 Da Zhang, Yan-Hua Zhai, Ling-An Wu *et al.*. Correlated two-photon imaging with true thermal light[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(18): 2354~2356
- 18 Xi-Han Chen, Qian Liu, Kai Hong *et al.*. Lensless ghost imaging with true thermal light[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(5): 695~697
- 19 Yangjian Cai, Shi-Yao Zhu. Ghost interference with partially coherent radiation[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(23): 2716~2718
- 20 Jun Xiong, De-Zhong Cao, Feng Huang *et al.*. Experimental observation of classical subwavelength interference with a pseudothermal light source [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, **94**(17): 173601~173604
- 21 Kaige Wang, De-Zhong Cao. Subwavelength coincidence interference with classical thermal light[J]. *Phys. Rev. A*, 2004, **70**(4): 041801
- 22 Wenlin Gong, Shensheng Han. Lens ghost imaging with thermal light: from the far field to the near field[J]. *Phys. Lett. A*, 2010, **374**(36): 3723~3725
- 23 Wenlin Gong, Shensheng Han. A method to improve the visibility of ghost images obtained by thermal light[J]. *Phys. Lett. A*, 2010, **374**(8): 1005~1008
- 24 D. Donoho. Compressed sensing[J]. *IEEE Trans. Information Theory*, 2006, **52**(4): 1289~1306
- 25 E. Candès, J. Romberg, T. Tao. Robust uncertainty principles: exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information [J]. *IEEE Trans. Information Theory*, 2006, **52**(2): 489~509
- 26 E. Candès, M. Wakin. An introduction to compressive sampling [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2008, **25**(2): 21~30
- 27 J. Romberg. Imaging via compressive sampling[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2008, **25**(2): 14~20
- 28 J. Haupt, R. Nowak. Signal reconstruction from noisy random projections [J]. *IEEE Trans. Information Theory*, 2006, **52**(9): 4036~4048
- 29 O. Katz, Y. Bromberg, Y. Silberberg. Compressive ghost imaging[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, **95**(13): 131110
- 30 Hui Wang, Shensheng Han. Fourier-transform ghost imaging based on compressive sampling algorithm[OL]. arXiv. Physics Optics, 2010, 1003. 6057v1
- 31 Wenlin Gong, Shensheng Han. Super-resolution ghost imaging via compressive sampling reconstruction[OL]. arXiv. Quant-ph, 2009, 0910. 4823v1
- 32 D. Duley, W. Duncan, J. Slaughter. Emerging digital micromirror device(DMD) application[C]. *SPIE*, 2003, **4985**: 14~25
- 33 Mário A. T. Figueiredo, Robert D. Nowak, Stephen J. Wright. Gradient projection for sparse reconstruction; application to compressed sensing and other inverse problems[J]. *IEEE J. Sel. Top. Signal Processing*, 2007, **1**(4): 586~598
- 34 Y. Shechtman, S. Gazit, A. Szameit *et al.*. Super-resolution and reconstruction of sparse images carried by incoherent light [J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(8): 1148~1150