

# 基于数字微镜器件的“后视”关联成像

唐文哲<sup>1,2</sup> 曹正文<sup>1</sup> 石剑虹<sup>2,3,4\*</sup> 曾贵华<sup>2,3,4</sup> 方双红<sup>1</sup>

<sup>1</sup>西北大学信息科学与技术学院, 陕西 西安 710100

<sup>2</sup>上海交通大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 上海 200240

<sup>3</sup>上海交通大学量子信息与感知处理研究中心, 上海 200240

<sup>4</sup>上海交通大学北斗导航与位置服务重点实验室, 上海 200240

**摘要** 传统成像的必要条件是相机对着物体。由于障碍物的遮挡,传统成像在很多时候都不能得到目标物体理想的像,但在关联成像机制下,借助一些障碍物的漫反射,适当调整反射的角度,可以实现相机在镜头不对着物体正面的情况下对目标正面成像,这在传统成像中,一般只能通过镜面反射才能做到。利用数字微镜器件(DMD)调制普通光源,可以改进传统的关联成像,省去参考光路的测量。而且,数字微镜器件使得例如发光二极管这种普通的光源也可以用来实现关联成像,对工程实现有重要意义。

**关键词** 成像系统; 关联成像; 鬼成像; 漫反射; 数字微镜器件

中图分类号 O438

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0511004

## Back-Side Correlation Imaging with Digital Micro Mirror

Tang Wenzhe<sup>1,2</sup> Cao Zhengwen<sup>1</sup> Shi Jianhong<sup>2,3,4</sup> Zeng Guihua<sup>2,3,4</sup> Fang Shuanghong<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Information and Technology, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710100, China

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Advanced Optical Communication System and Networks, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China

<sup>3</sup>Quantum Information and Perception Processing Center, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China

<sup>4</sup>Key Laboratory of Beidou Navigation and Location Service, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China

**Abstract** For conventional imaging methods, the camera lens facing the object is necessary. Because of obstacles, conventional imaging methods in many cases are not get the ideal image of the target object. But in correlation imaging, by setting an appropriate angle, the image is got without the camera lens lying in front of the target object with the diffusing on the obstacles. Under a digital micro-mirror device (DMD) modulation, the reference path is omitted. Also, DMD may also be used to implement the correlation imaging with ordinary light source, such as light emitting diode. It has broad prospects in engineering projects.

**Key words** imaging systems; correlation imaging; ghost imaging; diffuse; digital micro-mirror device

**OCIS codes** 110.0113; 110.1758; 110.3010

## 1 引 言

关联成像(鬼成像)是近几年发展起来的新的成像机制,具有分辨率高、抗噪性好、物像分离等优点。但在实验中,由于对信号路物体强度测量的探测器(点探测器、桶探测器)在对物体成像时都必须直接获得物体透射(反射)的光场强度,探测器的摆放位置受到很大的限制,从而在对地质勘测,军事应用等领域中运用受到影响,鬼成像的优势不能得到充分的体现。而借助光在其传播路线上的障碍物,后视关联成像可以在很

收稿日期: 2015-01-06; 收到修改稿日期: 2015-02-01

基金项目: 国家自然科学基金(61471239)、陕西省自然科学基金(2013JM8036)

作者简介: 唐文哲(1990-),男,硕士研究生,主要从事关联成像方面的研究。E-mail: 328035630@163.com

导师简介: 曹正文(1969-),女,副教授,硕士生导师,主要从事导航、量子通信等方面的研究。E-mail: caozhw@nwu.edu.cn

\*通信联系人。E-mail: purewater@sjtu.edu.cn

大程度上改善探测器的位置限制问题,在物体的前方、侧方、侧后方甚至正后方,都可获得物体正面的像。

最早的关联成像是以纠缠双光子作为光源<sup>[1-3]</sup>,其制备条件很苛刻。随着关联成像的发展,纠缠双光子逐渐被热光取代,而后,热光作为光源,广泛的应用于关联成像中<sup>[4-10]</sup>。之后,Shapiro<sup>[11]</sup>在理论上提出使用空间光调制器(SLM)来预置光源的光场强度信息,从而省去了参考光路对光场的实时测量,实现了单路关联成像的方案。这样只用一个单像素的探测器测量信号光路的光场总强度即可成像,这就是计算式鬼成像(CGI)。2009年,Bromberg等<sup>[12]</sup>在实验上实现了上述方案,成功得到了物体的像。

## 2 关联成像基本原理

经典的热光关联成像<sup>[8-10]</sup>实验原理如图1所示,光源发出的热光经过一个分束器(BS)分为两束,分别进入信号光路与参考光路。信号光路放置一个反射式的目标物体<sup>[15,16]</sup>,在物体反射光路上用一个固定的点探测器或者桶探测器检测点光强或者总光强信息;在参考光路上放置一个电荷耦合器件(CCD)测量光的强度分布信息,这个过程称为符合测量。测量时两个探测器应设置相同的采样间隔并保持同步,输出的光强信号输入到计算机内进行关联运算,从而恢复出目标物体的图像信息。

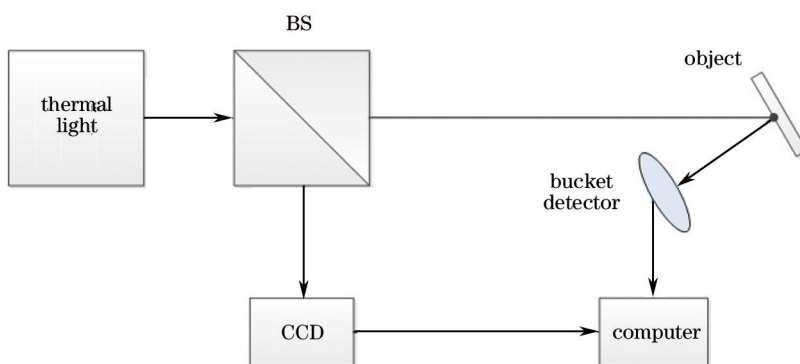


图1 经典热光关联成像示意图

Fig.1 Schematic of conventional thermal light correlation imaging

单路计算式关联成像<sup>[11-14]</sup>是在传统的热光关联成像基础上,用空间光调制器调制输入光源,图2为系统示意图。扩束的激光进入SLM,控制SLM产生相位随机变化的阵列,出射光束是经过调制的光束,并照射在目标物体上,然后将物体反射的图像信息的光信号用一个透镜会聚到点探测器检测,并保持探测器的采样频率和SLM产生的随机相位阵列频率一致,由于每次SLM产生的随机相位阵列是已知的,它作为参考光路的强度分布与实际信号光路的强度分布一致,结合点探测器测得的包含物体图形信息的总光强,利用符合测量算法能够恢复出该目标物体的像。

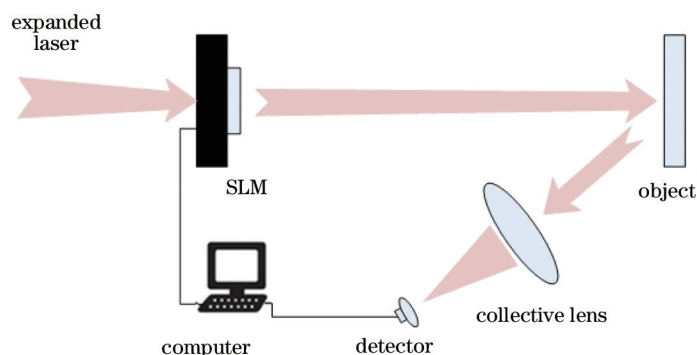


图2 计算式关联成像示意图

Fig.2 Schematic of computational correlation imaging

对信号光路物体  $N$  次测量,探测器得到的光场总强度  $S_i$ ,显然有

$$S_i = \sum_{(x,y) \in \Omega} I_i(x,y), \quad (1)$$

式中  $I_i(x,y)$  为探测平面上的光强分布,  $\Omega$  为光源是在该平面上的投影区域。而参考路光场强度为  $P_i(x,y)$  ( $1 \leq i \leq N$ ) 是已知的,那么重构的图像  $G(x,y)$  由关联算法计算得到

$$G(x,y) = \left\langle [S_i - \langle S_i \rangle] [P_i(x,y) - \langle P_i(x,y) \rangle] \right\rangle, \quad (2)$$

式中  $\langle \cdot \rangle = \frac{1}{N} \sum_i$  表示  $N$  次测量的平均值。

在后视成像中,光在照射物体后发生第一次漫反射,反射后光场照射到墙面,在墙面上发生第二次漫反射,第一次反射后的光场强度分布为  $I_i(x,y)$ ,第二次反射后的光场强度分布为  $J_i(x,y)$ ,反射前的总光强为  $S_i$ 。光在经过两次漫反射之后,物体的像的空间结构遭到了破坏,但探测器仍能够探测到部分光强,此光强  $S'_i$  应与反射前光强正相关,即

$$S'_i \propto \sum_{(x,y) \in \Omega} J_i(x,y) \propto \sum_{(x,y) \in \Omega} I_i(x,y), \quad (3)$$

因此,由(2)、(3)式可得到,由  $S'_i$  重构出的图像  $G'(x,y)$  满足:

$$G'(x,y) \propto G(x,y), \quad (4)$$

(4)式说明,在这种经过物体和墙面两次漫反射的关联成像过程中,探测器探测到的光强只是光场的部分能量,而利用这部分能量,就足以重构出物体的像。

在实际关联成像实验中,采用的是计算式关联成像,省去参考光路对光场强度的测量,只需要测量信号路的光场强度。而如今的计算式关联成像一般是通过数字微镜(DMD)对光源进行随机的强度调制<sup>[17]</sup>,在这种调制下,对光源的要求就降低了很多,日光也可用于关联成像。

### 3 实验过程及结果

实验中采用的光源是 Thorlab 公司的 DC2100 发光二极管(LED),抽运电流范围为 0~1600 mA,成像方案中用到了一个重要的器件是 X-DIGIT 公司的数字微镜器件,阵列大小为 1024×768,对角线长度为 0.7 英寸 (17.78 mm),微镜尺寸为 13.68 μm × 13.68 μm,微镜间隙是 1 μm。LED 将均匀光场投射到 DMD 面上,DMD 预制了由 Matlab 软件生成的黑白比为 1:1 的随机图,最小像素为 4 pixel×4 pixel,此光场经过 DMD 调制后,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。由 DMD 调制的信号可作为参考臂的空间光强分布信息,从而实现了单路关联成像。

实验中,待成像物体选用反射式物体——一枚一角硬币进行实验。LED 光源发出的光照射在 DMD 上,DMD 由电脑控制将光源调制,变为空间强度随机涨落的散斑场,后经过一个会聚透镜照在一枚硬币上发生漫反射,此时硬币反射的像落在墙面上,实验中用一个硬纸板代替,硬纸板漫反射的像由 CCD 相机进行采集,CCD 相机是 IOI 公司的 flare 2M360 相机,CCD 探测与 DMD 同步由计算机软件控制,并把每次测量得到的图像总光强保存下来。若要恢复出清晰的像,DMD 反射的明暗强度随机分布的散斑要清晰并且尽可能多的落在待测物体上,而且散斑颗粒的尺寸应尽可能小于物体表面细节的尺寸。

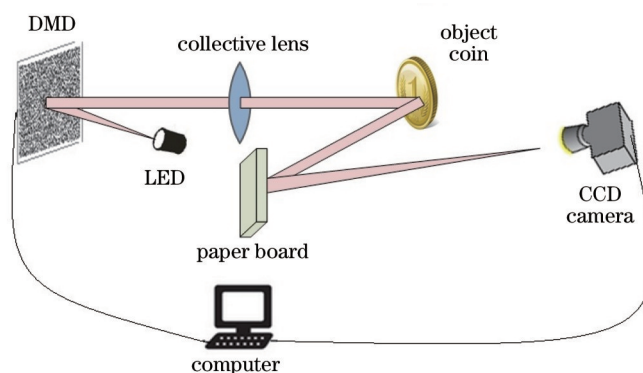


图3 后视成像实验示意图

Fig.3 Schematic of back-side imaging experiment

图3中LED灯摆放在距离DMD 20 cm处,入射角为20°,DMD距离硬币43 cm,硬币的直径为1.9 cm,硬纸板与硬币的距离为17 cm,CCD相机距离纸板25 cm。DMD调制后的光源经过硬币和硬纸板两次漫反射,由CCD采集像的强度信息,完成关联运算最终恢复硬币的像。实验中测量次数 $N$ 分别为2000,20000,200000,成像结果如图4所示。

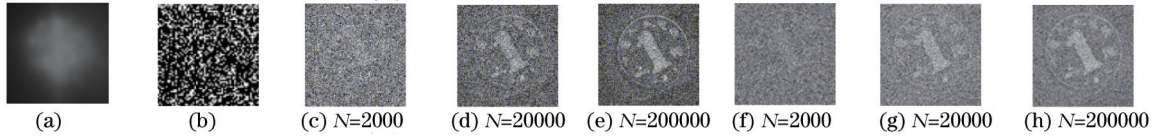


图4 后视成像的实验结果。(a) CCD拍摄的硬币影像;(b) DMD发出的随机散斑;(c)~(e)使用55 mm会聚透镜关联运算恢复的图像;(f)~(h)使用75 mm会聚透镜关联运算恢复的图像

Fig.4 Results of back-side imaging. (a) Image of the coin captured by CCD; (b) random speckle pattern sent by DMD; (c)~(e) reconstructed correlation images with 55 mm convergent lens; (f)~(h) reconstructed correlation images with 75 mm convergent lens

由图4可知,在测量次数增加时,采用不同会聚透镜恢复出的图像都会更清晰。采用55 mm会聚透镜时,投射到硬币所在面上的整幅散斑场的尺寸为7.3 cm×5.5 cm,硬币面积占散斑场面积的7.06%,由此可以计算出落在硬币上的散斑数约为3378。采用75 mm会聚透镜时,投射到硬币所在面上的整幅散斑场的尺寸为4.6 cm×3.3 cm,硬币占散斑场面积的18.68%,由此可以计算出落在硬币上的散斑数约为9179。由基于DMD的关联成像实验原理可以知道,在测量次数相同的情况下,图像的信噪比 $R_{SNR}$ 和落在物体上的散斑数 $N_r$ 负相关<sup>[4-5]</sup>,所以采用不同焦距的会聚透镜恢复出的图像质量会有差异。由于成像过程经历了两次漫反射,物体像的空间结构受到了很大程度地破坏,所以恢复时需要更多的测量次数才能得到比较清晰的像。若想获得更高的图像质量,可以采用以下方法:把DMD调制的散斑像素变小、采用长焦的会聚透镜,从而达到增加物体上散斑数目。但与此同时,需要更多的测量次数才能恢复出物体的像。

实验中,仅当光源LED灯的光强发生变化时,会对最终恢复出的图像可见度产生影响。图5为实验时设置LED灯的光强分别400,800,1600 mA时CCD采集到的图像和20000次测量后关联运算恢复出的图像(其他实验中参数均不变)。

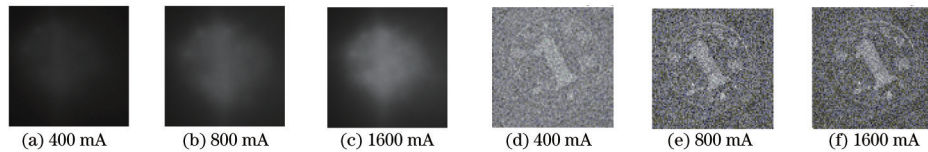


图5 不同光源强度漫反射实验结果。(a)~(c) CCD采集到的图像;(d)~(f)关联运算恢复出的图像

Fig.5 Diffuse experimental results of different light source intensities. (a)~(c) Images obtained by CCD; (d)~(f) images restored by correlation computing

由图5可知,随着光源光强的增大,恢复出的图像质量也会变好。这是因为在关联成像中,强度关联函数 $G(\rho) = \langle S I_r(\rho) \rangle$ ,信号与背景的比值定义为

$$R_{SBR} = \frac{\langle G(\rho_{in}) \rangle}{\langle G(\rho_{out}) \rangle} = \frac{\langle S_{in} I_r(\rho_{in}) \rangle}{\langle S_{out} I_r(\rho_{out}) \rangle}, \quad (5)$$

式中 $S_{in}$ 表示信号光路硬币反光区域的光强, $S_{out}$ 表示信号光路透光区域的光强(实验中硬币固定在一张纯黑色硬纸板,透光区域则为光落在黑纸板上的区域), $I_r(\rho_{in})$ 表示参考光路在 $\rho_{in}$ 处的光强, $I_r(\rho_{out})$ 表示参考光路在 $\rho_{out}$ 处的光强。实验为单路计算式关联成像系统,参考路是预制的,光强处处相等,故(5)式可化简为

$$R_{SBR} = \frac{\langle S_{in} \rangle}{\langle S_{out} \rangle}, \quad (6)$$

而可见度定义为

$$V = \frac{\langle G(\rho_{in}) \rangle - \langle G(\rho_{out}) \rangle}{\langle G(\rho_{in}) \rangle + \langle G(\rho_{out}) \rangle} = \frac{R_{SBR} - 1}{R_{SBR} + 1}, \quad (7)$$



可见,  $R_{\text{SBR}}$  越高, 可见度越高, 而随着光源光强的增大,  $S_{\text{in}}$  必然会增大, 而  $S_{\text{out}}$  增大的就不明显, 所以图像的可见度会提升。

## 4 结 论

利用DMD调制的普通LED光源和普通CCD相机, 实现了单路漫反射成像, 并对成像效果进行了一定的分析。实验成像过程中经历了两次漫反射, 能够得到较好的实验效果。理论上, 在测量次数足够多的情况下, 可以实现多次漫反射成像, 这将对很多领域产生影响, 具有广阔的前景。

## 参 考 文 献

- 1 D V Strekalov, A V Sergienko, D N Klyshko, *et al.*. Observation of two-photon "ghost" interference and diffraction[J]. *Phys Rev Lett*, 1995, 74(18): 3600.
  - 2 T B Pittman, Y H Shih, D V Strekalov *et al.*. Optical imaging by means of two-photon quantum entanglement[J]. *Physical Review A*, 1995, 52(5): R3429.
  - 3 A Gatti, E Brambilla, L A Lugiato, *et al.*. Quantum entangled images[J]. *Phys Rev Lett*, 1999, 83(9): 1763.
  - 4 B I Erkmen, J H Shapiro. Signal-to-noise ratio of Gaussian-state ghost imaging[J]. *Physical Review A*, 2009, 79(2): 023833.
  - 5 A Gatti, D Magatti, F Ferri. Three-dimensional coherence of light speckles: Theory[J]. *Physical Review A*, 2008, 78(6): 063806.
  - 6 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.
  - 7 W Gong, S Han. A method to improve the visibility of ghost images obtained by thermal light[J]. *Phys Lett A*, 2010, 374(8): 1005-1008.
  - 8 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): 093602.
  - 9 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.
  - 10 X H Chen, Q Liu, K H Luo, *et al.*. Lensless ghost imaging with true thermal light[J]. *Opt Lett*, 2009, 34(5): 695-697.
  - 11 J H Shapiro. Computational ghost imaging[J]. *Physical Review A*, 2008, 78(6): 061802.
  - 12 Y Bromberg, O Katz, Y Silberberg. Ghost imaging with a single detector[J]. *Physical Review A*, 2009, 79(5): 053840.
  - 13 S S Welsh, M P Edgar, R Bowman, *et al.*. Fast full-color computational imaging with single-pixel detectors[J]. *Opt Express*, 2013, 21(20): 23068-23074.
  - 14 P Clemente, V Durán, E Tajahuerce, *et al.*. Optical encryption based on computational ghost imaging[J]. *Opt Lett*, 2010, 35(14): 2391-2393.
  - 15 C Wang, D Zhang, Y Bai, *et al.*. Ghost imaging for a reflected object with a rough surface[J]. *Physical Review A*, 2010, 82(6): 063814.
  - 16 N D Hardy, J H Shapiro. Reflective ghost imaging through turbulence[J]. *Physical Review A*, 2011, 84(6): 063824.
  - 17 Lu Minghai, Shen Xia, Han Shensheng. Ghost imaging via compressive sampling based on digital micromirror device [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(7): 0711002.
- 陆明海, 沈 夏, 韩申生. 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): 0711002.

栏目编辑: 苏 岑