

利用鬼成像技术恢复被遮挡物体信息

孟晨, 王晓茜*, 高超, 苟立丹, 陈鹏, 姚治海

长春理工大学理学院, 吉林 长春 130022

摘要 很多时候人们希望能够获取一些被完全遮挡的待测物体的空间信息,但传统的成像方式不能很好地恢复被遮挡的待测物体的空间信息。鬼成像技术作为一种新型的计算成像技术,可用于恢复被遮挡物体的信息。基于前人的理论研究,设计实验方案并进行了实验研究,并对实验结果进行分析,从实验上验证了利用鬼成像技术恢复被遮挡物体信息的可行性,证实了待测物体与遮挡物体之间的距离是影响恢复被遮挡物体信息的重要因素。

关键词 成像系统; 鬼成像; 被遮挡物体; 信息恢复

中图分类号 O431.2

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1011030

Using Ghost Imaging Technique to Retrieve Information of Occluded Object

Meng Chen, Wang Xiaoqian*, Gao Chao, Gou Lidan, Chen Peng, Yao Zhihai

College of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract We always want to get some spacial information about occluded objects. However, traditional imaging techniques can not recover the spacial information of occluded objects to be tested. Ghost imaging, as a novel computational imaging scheme, recently has been used to recover the information of occluded objects. In this paper, we carry out experimental research based on previous theoretical research and analyze the experimental results, and the feasibility of using the ghost imaging technique to retrieve the information of occluded objects is verified. Furthermore, we confirm that the distance between the object to be tested and the occluded objects is an important factor affecting the recovery of the occluded object information.

Key words imaging systems; ghost imaging; occluded object; information recovery

OCIS codes 110.1758; 110.4850; 110.6150

1 引言

鬼成像又称双光子成像或关联成像,是一种新型成像技术。不同于传统光学成像基于光场强度的分布测量,鬼成像是基于光场强度涨落的关联测量。

1995年 Strelakov 等^[1]第一次从理论上提出通过纠缠光子对进行关联成像的方案,同年 Pittman 等^[2]正式提出了鬼成像的原型,宣告了鬼成像的诞生。Sergienko 等^[3]利用纠缠光子对作为光源成功

实现了鬼成像。2004年, Gatti 等^[4]提出了热光源鬼成像方案。2005年, Shih 小组使用赝热光完成了世界上第一个热光源鬼成像实验^[5]。2008年, Shapiro^[6]提出了计算鬼成像的实验方案,次年 Bromberg 等^[7]验证了该方案的可行性。计算鬼成像^[8]是将参考光提前设计好,然后利用空间光调制器对光源发出的光进行调制,以形成预设的散斑分布用于代替传统鬼成像中的参考臂部分,最终进行关联重建并获得被测物体图像。该方案的优点在于

收稿日期: 2020-10-14; 修回日期: 2020-10-21; 录用日期: 2020-11-12

基金项目: 吉林省教育厅优秀青年人才基金(20180520165JH)

* E-mail: xqwang21@163.com

只需要一条光路,这简化了鬼成像的实验条件。对于计算鬼成像系统,由于能够人为控制散斑图样,因此可以通过对散斑的设计来提高成像质量,该方法具有很大的应用价值。鬼成像具有很多传统成像所不具备的优点,如超高分辨率、抗噪声能力强、可实现非定域性成像、不需要透镜就能成像等特点^[9-15],近年来我国许多优秀学者对其算法和应用进行了深入研究^[16-19]。

Gao 等^[20]通过研究发现利用鬼成像技术可以对被完全遮挡的待测物体进行成像,而这在传统成像中是很难实现的,这是鬼成像技术相对于传统成像的另一个优点。传统成像中对于被遮挡物体信息的恢复大多基于计算机视觉^[21-23]中的数据统计,且多用于部分遮挡,即通过利用摄像机等传统成像设备对被部分遮挡的待测物进行采样后,对其没有被遮挡的部分进行图片分析,通过与数据库中的相似数据进行匹配,从而估计出被遮挡部分的信息。该技术仅可对被部分遮挡的待测物体进行辨认,无法恢复出待测物体被遮挡部分的空间信息并且无法对被完全遮挡的待测物体进行探测。Gao 等^[20]在其工作中通过对二阶关联函数的研究,提出并从理论上证明了利用鬼成像技术恢复被遮挡物体的空间信息的可行性。这个发现对于天文探测、军事勘探有着重要的参考价值,然而该研究仅限于数值模拟并未付诸实验研究。本文基于 Gao 等^[20]的理论,设计了实验方案并进行了相关实验研究,实验中通过调节待测物体与遮挡物体之间的距离进行研究,证实了待测物体与遮挡物体之间的距离是影响被遮挡物体信息恢复的关键因素。

本文首先简要介绍了利用鬼成像技术恢复被遮挡物体信息的理论,基于理论研究设计实验方案、进行实验研究,得到了较好的实验结果。所得结果证明了通过鬼成像技术恢复被遮挡物体信息的可行性。

2 基于鬼成像技术恢复被遮挡物体信息的理论研究

传统成像技术通常基于对待测物体的空间信息进行点对点获取,而鬼成像技术是利用不同的照明散斑与待测物体相互作用后的不同总光强来计算待测物体的空间信息,是一种基于涨落关联的计算成像,所以从理论上讲,如果桶探测器接收到的光强涨落受到的破坏较小,那么就可以通过鬼成像技术恢复待测物体的空间信息。

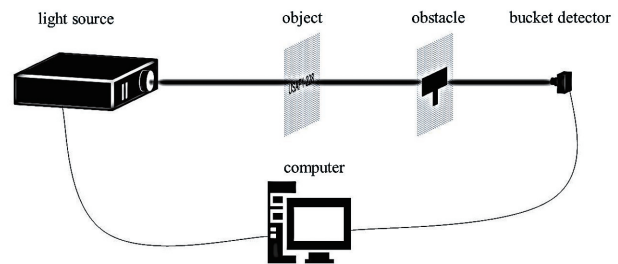


图 1 利用鬼成像技术恢复被遮挡物体信息的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of ghost imaging technique for recovering information of occluded object

如图 1 所示,利用连接计算机的光源发出预设的光斑并照射待测物体,光经过一段距离的传播到达遮挡物体,再经过一段距离的传播最终被桶探测器收集,其中遮挡物体的尺寸大小可以完全遮挡待测物体,但不能完全遮挡光源发出的光。该系统最终恢复的像可由二阶关联函数得到,即

$$G^{(2)}(x, y) = \langle I_R^{(n)}(x, y) B^{(n)} \rangle_n, \quad (1)$$

式中: $I_R^{(n)}(x, y)$ 为第 n 次采样时,连接计算机的光源发射出预设的光在待测物体所处平面上所形成的光强分布; $B^{(n)}$ 为第 n 次采样时,桶探测器所采集到的总光强值; $\langle \cdot \rangle_n$ 代表求统计平均值。其中第 n 次采样时,桶探测器所采集到的总光强值 $B^{(n)}$ 可以表示为

$$B^{(n)} = \iiint I_R^{(n)} T_1(x, y) h(x, y, x', y') T_2(x', y') h(x', y', x'', y'') dx dy dx' dy' dx'' dy'', \quad (2)$$

式中: $T_1(x, y)$ 为待测物体的透射函数; $T_2(x', y')$ 为遮挡物体的透射函数; $h(x, y, x', y')$ 为光在待测物体与遮挡物体之间自由传播的传递函数;

$h(x', y', x'', y'')$ 为光在遮挡物体到桶探测器之间自由传播的传递函数。将(2)式代入到(1)式中,二阶关联函数可表示为

$$G^{(2)}(x_1, y_1) = \langle I_R^{(n)}(x_1, y_1) \iiint I_R^{(n)}(x, y) T_1(x, y) h(x, y, x', y') T_2(x', y') \times h(x', y', x'', y'') dx dy dx' dy' dx'' dy'' \rangle. \quad (3)$$

通过观察(3)式,可以发现此系统的二阶关联函数中既包含待测物体的信息,又同时包含遮挡物体的信息。此时光源照射在遮挡物体所处平面上形成的光强分布 $I'_R(x',y')$ 为

$$I'_R(x',y') = \iint I_R^{(n)}(x,y) T_1(x,y) \times h(x,y,x',y') dx dy. \quad (4)$$

光源发射的光斑在自由传播过程中会发生变化,如图 2 所示。

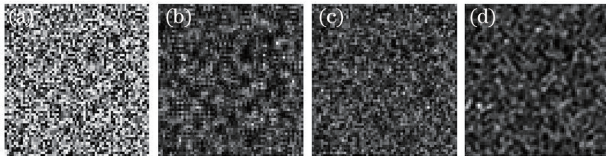


图 2 随机散斑经过不同距离的传播后的分布情况。
(a)初始随机散斑;随机散斑经过 (b) 1 cm、
(c) 10 cm 和(d) 25 cm 传播后的散斑分布情况

Fig. 2 Distributions of random speckles after propagating different distances. (a) Distribution of initial random speckles; distributions of random speckles after propagating (b) 1 cm, (c) 10 cm, and (d) 25 cm, respectively

图 2 为散斑在经过不同距离传播后的分布情况,可以看出:当传播距离较小时,散斑的光强涨落变化不是非常明显,而当传播距离较大时,散斑的光强涨落明显有所不同。根据(3)式,二阶关联函数主要利用待测物体平面的散斑进行运算,如果两个散斑涨落一致,则可以恢复出相应平面的形状信息。因此当传播距离较小时,二阶关联函数应该包含 T_1 和 T_2 。而在传播距离较远的情况下,光到达遮挡物体时的散斑与二阶关联函数中参考光路的散斑形式不同,此时不能恢复出 T_2 。因此,当待测物体与遮挡物体之间的距离足够大时,利用鬼成像技术就可以实现对待测物体的成像。

3 利用鬼成像技术恢复被遮挡物体信息的实验研究

利用鬼成像技术恢复被遮挡物体信息的实验系统示意图如图 3 所示,整个实验系统包括计算机、光源、成像物体、遮挡物体和桶探测器。计算机控制投影仪作为光源投射预先生成的一系列照明图样,通过调节投影仪镜头使散斑照射在待测物体上,透过的光传播一定距离后照射到遮挡物体,大部分透射光被桶探测器接收,通过将探测结果在计算机上进行关联运算可以恢复待测物体的像。

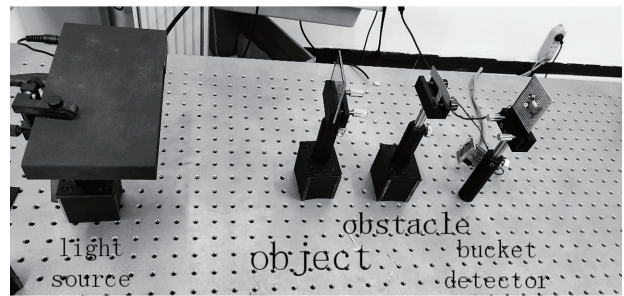


图 3 利用鬼成像技术恢复被遮挡物体信息的实验系统示意图

Fig. 3 Diagram of experimental system using ghost imaging technique to recover information of occluded object

实验中使用的待测物体为大恒光电 USAF1951 标定板上的“USAF1-”字样,遮挡物体为一个 T 型的不规则铜片,且铜片大小可以完全遮挡住作为待测物体的“USAF1-”字样。作为光源使用的照明图样是用计算机生成的哈达玛衍生物。光源到待测物体的距离为 14 cm,遮挡物到探测器的距离为 10 cm,每次实验进行 10000 次采样。

图 4(a)是通过摄像机从光源方向观察到的待测物体与遮挡物体,此时可以看到待测物体,即标定板上的“USAF1-228”字样,还可以看到待测物体后面的遮挡物体,即 T 形铜片。由于照明散斑大小存在一定的限制,在实验中仅用“USAF1-”部分作为待测物体,可以看出实验所用的遮挡物体远大于待测物体,这可以保证完全遮挡待测物体。在实验过程中采用哈达玛散斑对“USAF1-”字样进行照射而遮挡物体只遮挡“USAF”部分,通过参考“1-”部分在成像时的位置就可以推断出“1-”部分的左边部分,即实验中恢复的被遮挡物体的像。图 4(b)为通

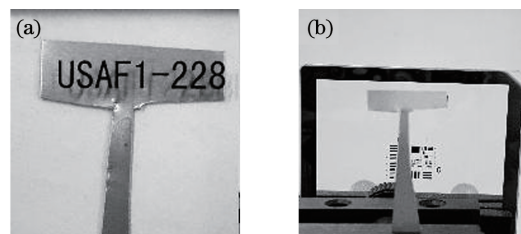


图 4 待测物体与遮挡物体。(a)从光源方向观察到的待测物体与遮挡物体;(b)从探测器方向观察到的待测物体与遮挡物体

Fig. 4 Measured objects and occluded objects. (a) Measured object and occlusion object observed from direction of source; (b) measured object and occlusion object observed from direction of detector

过摄像机从探测器方向观察到的待测物体与遮挡物体,可以看出传统成像方式是无法对被遮挡的待测物体进行成像的。

在不同的待测物体与遮挡物体的距离下,利用鬼成像技术恢复被遮挡物体的信息,实验结果如图 5 所示。通过观察图 5 的重构像中对“1-”字样左边部分即待测物体的图像信息的恢复情况发现,待测物体的像随着距离的增大而逐渐清晰可辨。如图 5(a)~(c)所示,当待测物体与被遮挡物体的距离比较小时,得到的图像中包含了待测物体的信息和遮挡物体的信息,遮挡物体边缘的信息在这种情

况下比较清晰,而被遮挡的待测物体的信息也能被恢复出一部分,但这部分信息被埋在遮挡物体的信息当中,两者很难分辨。而随着待测物体和遮挡物体距离的增大,被遮挡的待测物体的信息已经比较清晰,而遮挡物体的信息还会存在,但是边缘相对之前的图像不再清晰,如图 5(d)~(f)所示。当待测物体和遮挡物体的距离再进一步增大时,被遮挡的待测物体已经被完全恢复出,而遮挡物体的空间信息则基本体现不出来了,如图 5(g)~(i)所示,此时就可以很好地恢复出被遮挡的待测物体的信息。

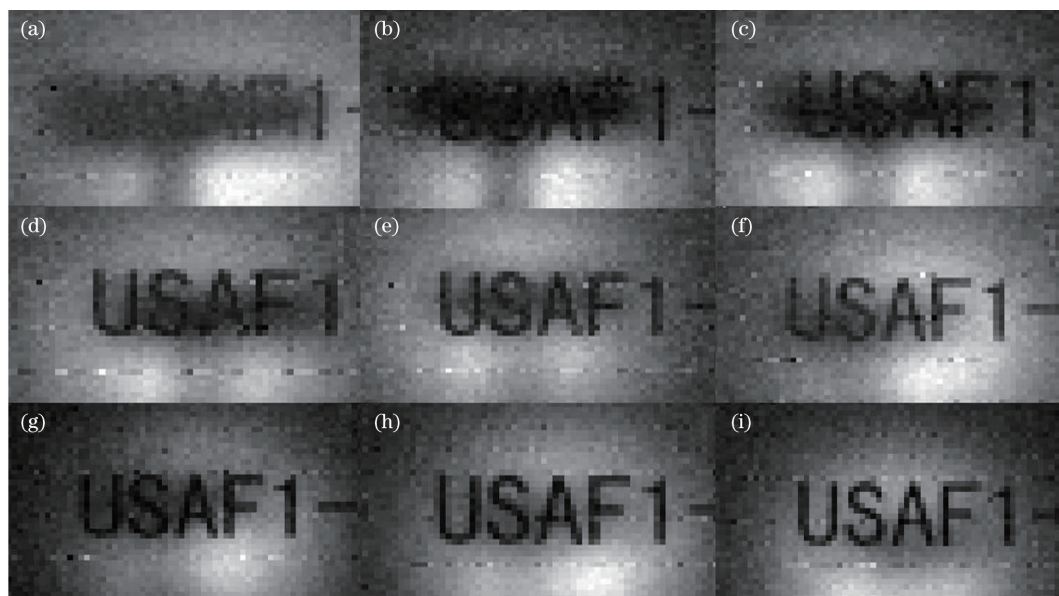


图 5 在不同的待测物体与遮挡物体的距离下,利用鬼成像技术恢复被遮挡物体信息的实验结果。(a) 11 cm;(b) 13 cm;(c) 15 cm;(d) 18 cm;(e) 20 cm;(f) 22 cm;(g) 24 cm;(h) 25 cm;(i) 27 cm

Fig. 5 Experimental results of occluded object information recovered by ghost imaging technique for different distances between object to be tested and occluded object. (a) 11 cm; (b) 13 cm; (c) 15 cm; (d) 18 cm; (e) 20 cm; (f) 22 cm; (g) 24 cm; (h) 25 cm; (i) 27 cm

通过对实验结果的分析可以发现,利用鬼成像技术可以很好地恢复被遮挡物体的信息,但是这需要待测物体与遮挡物体之间的距离足够大,而较小距离时该技术只能恢复模糊的待测物体信息且包含遮挡物体信息,当距离太小时该技术不能恢复待测物体信息。这证实了待测物体与遮挡物体之间的距离大小是影响利用鬼成像技术恢复被遮挡物体空间信息的重要因素之一。

4 结 论

理论上给出了利用鬼成像技术恢复的被遮挡物体信息的二阶关联函数的积分形式。通过研究发现二阶关联函数中既包含待测物体的信息也包含遮挡物体的信息,利用二阶关联函数恢复的重构像中是

否包含遮挡物体的信息取决于空间传播影响的大小。搭建了实验平台,在实验中利用相同波长的光源,通过调节待测物体与遮挡物体之间的距离进行实验。通过对理论与实验结果的对比分析得到以下结论:当待测物体与遮挡物体之间的距离较小时,从光源发出并经过一系列的传播最终到达桶探测器的光信号受空间传播的影响较小,受到遮挡物体的影响较大,所以无法恢复出待测物体的像;当待测物体与遮挡物体之间的距离足够大时,空间传播对从光源发出并经过一系列传播的光信号的影响较大,受到遮挡物体的影响则变得足够小,此时可以恢复出待测物体的像。因此待测物体与遮挡物体之间的距离是利用鬼成像技术恢复被遮挡物体信息的关键影响因素,且距离越大越容易对被遮挡的待测物体进

行成像,这证明了利用鬼成像技术恢复被遮挡物体信息的可行性,且实验设备简单、成本低、易于实现。恢复被遮挡物体的信息在多个领域有着较大的实用价值和广阔的应用前景,本文工作为进一步研究对被遮挡的未知待测物体的探测积累了经验,促进了鬼成像技术在类似特殊情况下的实际应用。

参 考 文 献

- [1] Strelakov D V, Sergienko A V, Klyshko D N, et al. Observation of two-photon “ghost” interference and diffraction[J]. *Physical Review Letters*, 1995, 74(18): 3600-3603.
- [2] Pittman T B, Shih Y H, Strelakov D V, et al. Optical imaging by means of two-photon quantum entanglement [J]. *Physical Review A, Atomic, Molecular, and Optical Physics*, 1995, 52(5): R3429-R3432.
- [3] Sergienko A V, Shih Y H, Rubin M H. Experimental evaluation of a two-photon wave packet in type-II parametric downconversion[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1995, 12(5): 859-862.
- [4] 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.
- [5] Scarcelli G, Valencia A, Shih Y. Two-photon interference with thermal light [C]//2005 Quantum Electronics and Laser Science Conference, May 22-27, 2005, Baltimore, MD, USA. New York: IEEE Press, 2005: 292-294.
- [6] Shapiro J H. Computational ghost imaging [J]. *Physical Review A*, 2008, 78(6): 061802.
- [7] Bromberg Y, Katz O, Silberberg Y. Ghost imaging with a single detector[J]. *Physical Review A*, 2009, 79(5): 053840.
- [8] Gao C, Wang X Q, Wang Z F, et al. Optimization of computational ghost imaging[J]. *Physical Review A*, 2017, 96(2): 023838.
- [9] Li L Z, Yao X R, Liu X F, et al. Super-resolution ghost imaging via compressed sensing [J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(22): 224201.
李龙珍, 姚旭日, 刘雪峰, 等. 基于压缩感知超分辨率鬼成像[J]. *物理学报*, 2014, 63(22): 224201.
- [10] Zhou Y, Zhang H W, Zhong F, et al. Iterative denoising of ghost imaging based on adaptive threshold method[J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(24): 244201.
周阳, 张红伟, 钟菲, 等. 基于自适应阈值方法实现迭代降噪鬼成像[J]. *物理学报*, 2018, 67(24): 244201.
- [11] Zhang M H, Wei Q, Shen X, 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与实验验证[J]. *光学学报*, 2007, 27(10): 1858-1866.
- [12] Gong W L, Han S S. Experimental investigation of the quality of lensless super-resolution ghost imaging via sparsity constraints[J]. *Physics Letters A*, 2012, 376(17): 1519-1522.
- [13] Scarcelli G, Berardi V, Shih Y. Phase-conjugate mirror via two-photon thermal light imaging [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 88(6): 061106.
- [14] Chen M Y, Wu H, Wang R Z, et al. Computational ghost imaging with uncertain imaging distance [J]. *Optics Communications*, 2019, 445: 106-110.
- [15] Zhang Y, Li W D, Wu H Z, et al. High-visibility underwater ghost imaging in low illumination [J]. *Optics Communications*, 2019, 441: 45-48.
- [16] Wang F, Wang H, Bian Y M, et al. Applications of deep learning in computational imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(1): 0111002.
王飞, 王昊, 卞耀明, 等. 深度学习在计算成像中的应用[J]. *光学学报*, 2020, 40(1): 0111002.
- [17] Yan G Q, Yang F B, Wang X X, et al. Computational ghost imaging based on orthogonal sinusoidal speckle [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(4): 041019.
闫国庆, 杨风暴, 王肖霞, 等. 基于正交化正弦散斑的计算鬼成像[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(4): 041019.
- [18] Wang C L, Gong W L, Shao X H, et al. Influence of receiving numerical aperture and rough target size on ghost imaging via sparsity constraint [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(8): 0810002.
王成龙, 龚文林, 邵学辉, 等. 接收数值孔径和粗糙目标尺寸对稀疏限制的鬼成像影响研究[J]. *中国激光*, 2019, 46(8): 0810002.
- [19] Yang S C, Yu H, Lu R H, et al. Simulation of Fourier-transform ghost imaging using polychromatic X-ray sources[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(5): 0511003.
杨善初, 喻虹, 陆荣华, 等. 非单色 X 光傅里叶变换鬼成像模拟[J]. *光学学报*, 2019, 39(5): 0511003.
- [20] Gao C, Wang X Q, Gou L D, et al. Ghost imaging for an occluded object [J]. *Laser Physics Letters*, 2019, 16(6): 065202.
- [21] Lyu G J, Mao X, Hu Y J, et al. One method to detect tracking occlusions based on evaluation forward

- and backward errors[J]. *Infrared Technology*, 2016, 38(4): 337-341, 347.
- 吕高杰, 毛鑫, 胡银记, 等. 一种基于前后向误差比较的检测跟踪遮挡方法 [J]. *红外技术*, 2016, 38(4): 337-341, 347.
- [22] Xiao J J, Stolkin R, Gao Y Q, et al. Robust fusion of color and depth data for RGB-D target tracking using adaptive range-invariant depth models and spatio-temporal consistency constraints [J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2018, 48(8): 2485-2499.
- [23] Delail B A, Bhaskar H, Zemerly M J, et al. Robust likelihood model for illumination invariance in particle filtering [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2018, 28(10): 2836-2848.