

# 散射介质中强度关联成像的研究综述

宋明悦<sup>1</sup>, 李高亮<sup>2</sup>, 余远金<sup>3</sup>, 杨照华<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191;

<sup>2</sup>北京华航无线电测量研究所, 北京 100013;

<sup>3</sup>北京理工大学自动化学院, 北京 100081

**摘要** 获得散射介质中清晰的物体图像在军事反恐、医学成像和海洋探测等方面都具有重要的应用价值。经典光学成像的本质是直接记录物体反射光强的一阶关联成像,但随着散射介质质量浓度和光传输距离的增加,图像质量会迅速下降,甚至无法成像。关联成像技术利用光场涨落的统计性质,通过符合测量以及二阶强度关联特性重构图像,可减小环境对成像质量的影响,为获得散射介质中的物体图像提供了一种新的成像手段。因此,从不同散射介质、不同路径和不同补偿重构算法三方面阐述了近年来散射介质中强度关联成像的国内外研究成果,并对强度关联成像的应用进行了总结与展望。

**关键词** 成像系统; 关联成像; 鬼成像; 散射介质; 补偿重构算法

中图分类号 O431.2

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1011019

## Research Review on Intensity Correlation Imaging in Scattering Media

Song Mingyue<sup>1</sup>, Li Gaoliang<sup>2</sup>, Yu Yuanjin<sup>3</sup>, Yang Zhaohua<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> School of Instrumentation and Optoelectronic Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

<sup>2</sup> Beijing Huahang Radio Measurement Institute, Beijing 100013, China;

<sup>3</sup> School of Automation, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

**Abstract** Obtaining clear object images in the scattering media has an important application value in military counterterrorism, medical imaging, and ocean exploration. The essence of classic optical imaging is to directly record the first-order correlation imaging of the reflected light intensity of the object. However, as the mass concentration of the scattering media and the light transmission distance increase, the image quality declines rapidly and even imaging cannot be performed. Correlation imaging technology uses statistical properties of light field fluctuations to reconstruct images through coincidence measurement and second-order intensity correlation characteristics. The use of correlation imaging can reduce the environmental impact on imaging quality and provide a new imaging method for obtaining object images in scattering media. Therefore, the research results of intensity correlation imaging in scattering media at home and abroad in recent years are expounded from three aspects of various scattering media types, paths, and compensation reconstruction algorithms in this paper, and the application of intensity correlation imaging is summarized and prospected.

**Key words** imaging systems; correlation imaging; ghost imaging; scattering media; compensation reconstruction algorithm

**OCIS codes** 110.3010; 100.3020; 110.0113

收稿日期: 2021-03-05; 修回日期: 2021-04-01; 录用日期: 2021-04-14

基金项目: 国家自然科学基金(61801452, 61973018)、民用航天技术预先研究项目(D040301)、北京航空航天大学青年拔尖人才支持计划(YWF-21-BJ-J-414)

\* E-mail: yangzh@buaa.edu.cn

# 1 引言

透过云雾获得散射介质中清晰的物体图像在国防军事、医学诊断以及海洋探测等方面有广泛的应用前景。传统光学成像方式多通过不同的透镜组建立物面与成像平面中点与点的对应关系,当光传输路径中存在散射介质时,光与物质的相互碰撞会使光的传输路径发生随机变化,难以建立光场对应关系<sup>[1-2]</sup>。散射介质的质量浓度较高时,甚至无法得到物体的像,严重阻碍了成像技术的发展。为了对散射介质中的物体进行成像,人们提出了傅里叶滤波<sup>[3]</sup>、偏振门控滤波<sup>[4]</sup>、时间选通<sup>[5-6]</sup>等成像技术,这些技术能在一定程度上提高成像质量,但设备复杂、成本高、光路实现难度大;且传统成像方式属于一阶强度关联成像,抗干扰能力弱。热光关联成像作为一种新的成像技术,属于二阶强度关联成像,具有非视域成像和抗干扰能力强的特点,且光路简单、成本低、鲁棒性强,为获得散射介质中清晰的物体图像提供了新思路。

本文总结了近年来关于散射介质中关联成像的研究进展,并将研究成果分为三部分。第一部分为对不同种类和不同浓度散射介质中成像质量的实验验证;第二部分为光学系统的优化设计,并对比了散射介质位于光路不同路径时的成像结果;第三部分为补偿重构算法的研究。

## 2 关联成像原理简介

传统光学成像的本质是一阶关联成像,二阶关联成像也被称为鬼成像。由于早期的关联成像研究借助纠缠光子对实现,也被称为双光子成像或量子关联成像<sup>[7-9]</sup>。与传统成像方式不同,关联成像光路的最大特点就是可实现物像分离,即实验中需用分束器将光分成两路,同时进行探测。通过物体的光为信号光,通常使用没有空间分辨能力的桶探测器探测其光强;没有通过物体的光为参考光,一般用具有空间分辨能力的面阵探测器或 CCD 相机记录光场分布,重建物体图像时需对二者记录的信息进行符合关联运算。计算关联成像(CGI)与单像素成像原理相同,通过空间光调制器加载调制散斑序列,将成像系统从双路变为单路。

对于关联成像的研究可大致分为三方面:一是用纠缠光作为光源的量子纠缠成像理论及其实验研究;二是用热光或赝热光作为光源的热光关联成像理论及实验研究;三是单光臂 CGI 及其实验研

究<sup>[8-9]</sup>。关联成像原理最早可以追溯到 1956 年著名的 HBT (Hanbury-Brown-Twiss) 实验,由 Brown 等<sup>[10-11]</sup>用两个射电望远镜同时接收天狼星的光强信号,再通过强度干涉仪对二者进行关联运算,获取了恒星的角直径。1988 年, Klyshko<sup>[12]</sup>率先利用纠缠光子对实现了双光子关联成像方案。1994 年, Shih 等<sup>[13-14]</sup>完成了基于双光子纠缠源的量子成像和干涉实验。2002 年, Bennink 等<sup>[15]</sup>利用转镜产生随机非相干的模拟纠缠光,证明了经典光源方案的可行性。2005 年, Zhang 等<sup>[16]</sup>使用空心阴极灯作为光源,完成了真实热光源下的关联成像。2009 年, Shapiro<sup>[17]</sup>正式提出 CGI 的方案,且仅使用了一个探测器;随后, Bromberg 等<sup>[18]</sup>使用空间光调制器证明了该方案的可行性,并简化了光路设计,推动了关联成像的发展。

在图像重建方面,为突破奈奎斯特采样定理的极限,实现低采样率下的高质量图像重建<sup>[19-20]</sup>,人们用传统二阶关联算法结合新的理论方法,提出了基于压缩感知、哈达玛基、傅里叶基以及神经网络的成像方案,并取得了显著的成果。针对不同领域的特点,人们扩展了关联成像技术的应用范围。如光谱仪将关联成像从单一谱段扩展到多光谱<sup>[21]</sup>,实现了彩色物体成像;时间相关的单光子计数器用来记录光子飞行时间,将二维图像扩展至三维<sup>[22-23]</sup>;高速信号处理器可快速计算大量数据,实现实时成像<sup>[24]</sup>。关联成像技术也从只能对静止目标成像扩展到对运动目标成像<sup>[25-26]</sup>以及图像追踪<sup>[27-28]</sup>领域。

## 3 国内外研究现状

根据研究目的将散射介质中的强度关联成像研究分为不同散射介质对关联成像的影响、不同路径散射介质对关联成像的影响以及补偿重构算法的研究。

### 3.1 不同散射介质对关联成像的影响

2011 年, Gong 等<sup>[29]</sup>基于二阶关联成像在散射介质中获得了高质量的图像,穿透散射介质的热光关联成像方案如图 1 所示。其中,  $G(x, y)$  为二阶关联运算函数,  $(x, y)$  为图像中点的坐标。实验采用的散射介质为 NaCl 悬浮液,将物体分别放在介质中的不同位置,模拟光路中物体前后散射介质厚度对成像结果的影响,其中,  $L_1$  为光源到物体前的散射介质厚度,  $L_2$  为物体到探测器(Dt)前的散射介质厚度。实验结果表明,当测试路径的 Dt 为桶探测器时,图像质量随  $L_2$  的增大而衰减;当 Dt 为 CCD

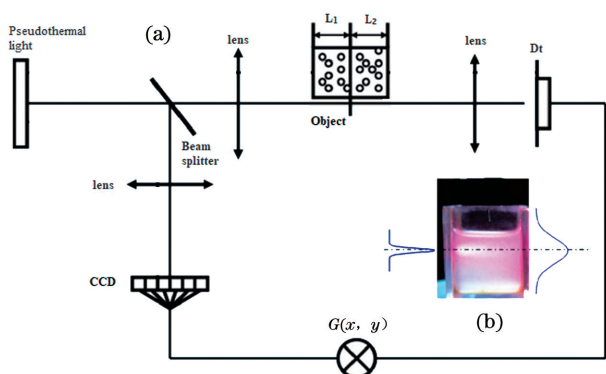


图 1 实验装置图。(a)二阶关联成像方案的原理；  
(b)激光束穿过散射介质的照片<sup>[29]</sup>

Fig. 1 Diagram of the experimental setup. (a) Principle of the second-order correlation imaging scheme; (b) photograph of the laser beam passing through the scattering media<sup>[29]</sup>

相机时,对于散射介质只存在物前或物后,即  $L_1 = 0$  或  $L_2 = 0$  时,不会影响关联成像的重构结果。2013 年,Chen 等<sup>[30]</sup>开发了基于稀疏约束的激光雷达成像系统,在不同天气情况下实现了对距离为 2 km 物体的成像。图 2 为鬼成像激光雷达(GIL)系统的实验装置,传统成像和使用关联成像算法以及稀疏约束非线性算法重建的图像如图 3 所示。其中,序列(I)为现场实验场景,序列(II)为传统成像结果,序列(III)为鬼成像重建结果,序列(IV)为稀疏约束非线性重建的图像。可以发现,相比传统成像,关联成像受散射介质的影响较小,抗干扰能力强,成像质量好。

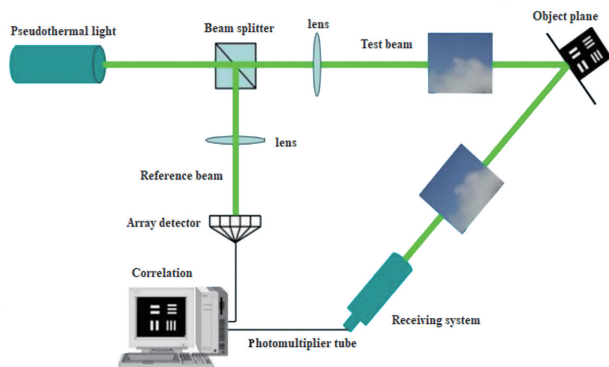


图 2 GIL 系统的实验装置图<sup>[30]</sup>

Fig. 2 Experimental setup diagram of the GIL system<sup>[30]</sup>

2014 年,张银佐<sup>[31]</sup>用 LED 光源对毛玻璃前的物体进行关联成像。实验用静止和旋转的毛玻璃分别模拟静态和动态变化的散射介质,并对存在动态散射介质时采集的数据进行快速傅里叶滤波,以消除噪声的影响,成像结果如图 4 所示。其中,采样数  $N = 60000$ ,光分别穿过静态、动态散射介质以及动

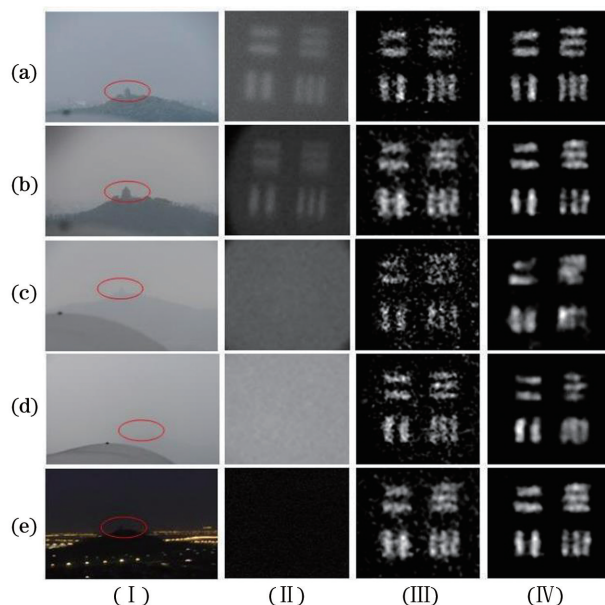


图 3 GIL 系统的实验结果。(a)晴朗;(b)多云;(c)小雨;  
(d)中雾;(e)夜间<sup>[30]</sup>

Fig. 3 Experimental results of the GIL system. (a) Clear; (b) cloudy; (c) light rain; (d) moderately foggy; (e) night<sup>[30]</sup>

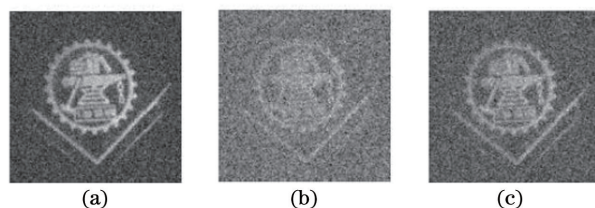


图 4 三种不同情况的成像结果。(a)静止的散射介质;  
(b)运动的散射介质;(c)滤波后的成像结果<sup>[31]</sup>

Fig. 4 Imaging results of three different situations. (a) Static scattering media; (b) moving scattering media; (c) filtered imaging result<sup>[31]</sup>

态散射滤波后重建图像的信噪比分别为 16.58、2.13 和 6.12。剧烈变化的散射介质引起的噪声会对信号的涨落造成一定影响,导致成像质量较差。通过滤波或改进成像算法等方式可消除部分噪声的影响,提高重建图像的质量;且在实际应用中,散射介质一般是动态、随机的,因此研究动态散射介质对关联成像的影响实际应用价值更大。文献<sup>[32-35]</sup>相继进行了穿过烟幕、碳酸钙溶液、脂肪溶液等散射介质对物体的成像实验。

基于关联成像的抗干扰能力,人们研究了水下关联成像方法。2012 年,钟森城等<sup>[36]</sup>研究了前向散射对水下激光成像的影响。2019 年,赵美晶<sup>[37]</sup>提出了一种水下偏振鬼成像算法,该算法利用偏振消除后向散射的影响,并基于压缩感知算法重建图像,在

浑浊度为 52 FTU 时重建图像的结构相似度仍大于 0.85;赵明等<sup>[38]</sup>针对水下成像环境中的后向散射问题,提出了水下推扫式鬼成像方法。2020 年,殷曼倩<sup>[39]</sup>研究了水下振幅物体和相位物体的鬼成像方法。上述研究结果均表明,相比传统成像技术,关联成像技术的抗干扰能力更强,可探测的物体距离更远,可用于水下物体检测,对于海洋军事应用、海洋资源勘探等方面具有重要意义。

在生物医学检测方面,2013 年,Bina 等<sup>[40]</sup>分析了后向散射对差分鬼成像的影响,通过实验获得了浑浊溶液内薄黑色物体的像,其探测深度可达 11.3 mm。2014 年,Durán 等<sup>[41]</sup>用单像素相机实现了夹在两层鸡肉组织(厚度分别为 2.84 mm 和 2.92 mm)中物体的成像,实验光学装置原理如图 5

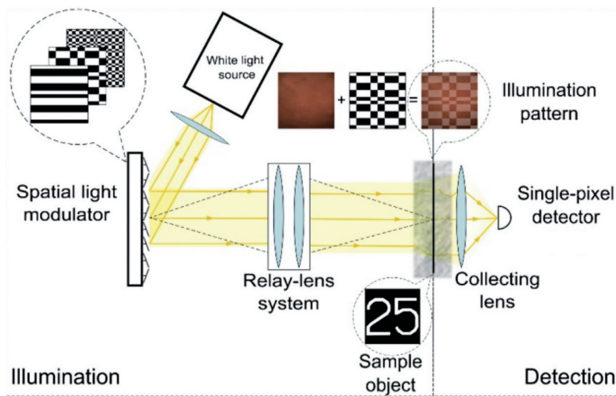


图 5 光学装置的原理图<sup>[41]</sup>

Fig. 5 Schematic diagram of the optical device<sup>[41]</sup>

所示,不同光强下重建的图像如图 6 所示。可以发现,随着检测光强的增大,重建图像的质量逐渐上升,峰值信噪比(PSNR)也逐渐升高,但当光强增大到一定值后,继续增大光强对图像 PSNR 的提高不明显。由于该实验中使用的检测光曝光强度远低于组织损伤的阈值,可被应用在医学领域实现无损伤组织成像。

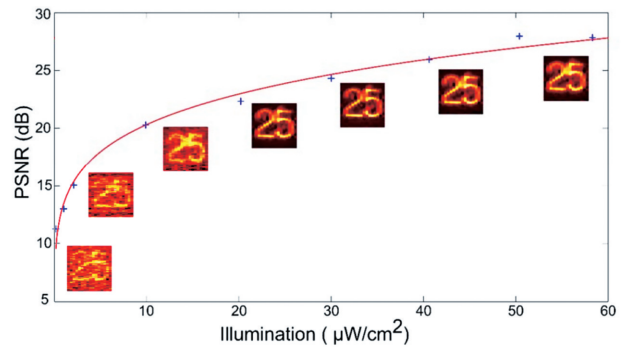


图 6 不同光强得到的图像 PSNR<sup>[41]</sup>

Fig. 6 Image PSNR obtained at different light intensities<sup>[41]</sup>

### 3.2 不同路径散射介质对关联成像的影响

为了探究散射介质处于光路中不同路径时对重建图像质量的影响,2016 年,刘保磊等<sup>[42]</sup>对散射介质位于不同路径时对 CGI 的影响进行了研究。图 7 为散射介质位于不同路径下的 CGI 光路图,其中, M 为全反镜, D<sub>A</sub>、D<sub>B</sub> 分别为发射和接收路径的散射介质, SLM 为空间光调制器。该实验分别对比了散射介质位于发射路径、接收路径以及发射和接收路

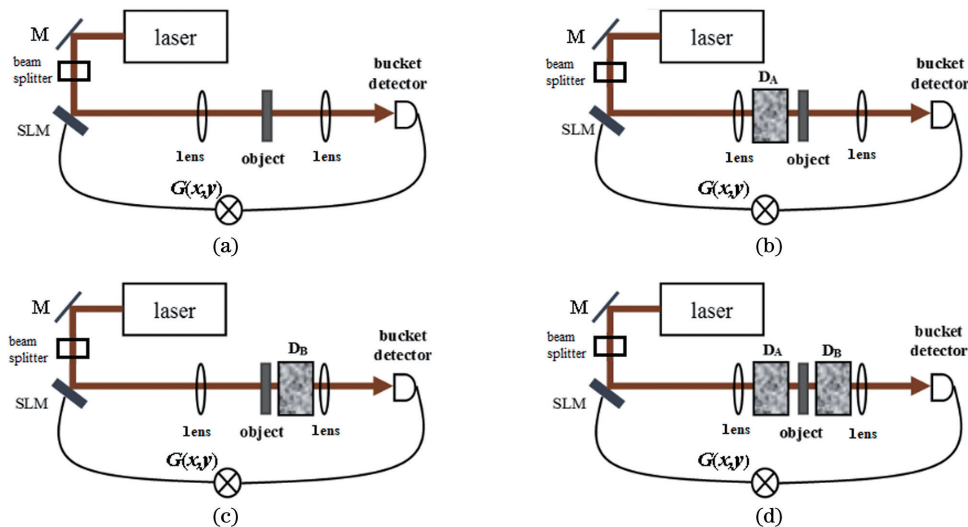


图 7 CGI 的光路图。(a)无散射介质;(b)散射介质位于发射路径;(c)散射介质位于接收路径;(d)散射介质位于发射路径及接收路径<sup>[42]</sup>

Fig. 7 Optical path diagram of the CGI. (a) Non-scattering media; (b) scattering media is located in the transmitting path; (c) scattering media is located in the receiving path; (d) scattering media is located in the transmitting path and the receiving path<sup>[42]</sup>

径时的成像情况,结果表明,发射路径的散射介质会导致重建图像质量的衰减,接收路径中的散射介质则不会影响成像结果。原因是发射路径受散射介质的影响,导致参考光强分布发生变化;而接收路径在散射介质各向同性条件下,只造成桶探测器测量值总光强下降,并不影响二阶关联。该小组还使用了穿透力强的近红外光源,在能见度低于 500 m 的大气环境中对 688 m 处的白炽灯进行成像<sup>[43]</sup>,并设计了散射介质对强度关联成像影响的教学实验<sup>[44]</sup>。

2016 年, Yang 等<sup>[45]</sup>实现了穿过强散射介质的无透镜鬼成像(LGI),该强散射介质为一个 2 mm 厚的磨砂玻璃盘。LGI 系统的原理如图 8 所示,磨砂盘分别放置在图中 A、B、C 三个位置, $g^{(2)}$ 为二阶关联运算。由于没有用透镜会聚光强,CCD 相机无法接收到全部的透射光,因此引入衰减因子,并经过严格的公式推导证明了该系统在散射介质位于物体到 CCD1 的整个路径时都具有鲁棒性。相比文献<sup>[42]</sup>,该实验只进行了理论分析与仿真模拟,但该实验创新性地删去光路中的会聚透镜,简化了光路,降低了系统的制造成本。

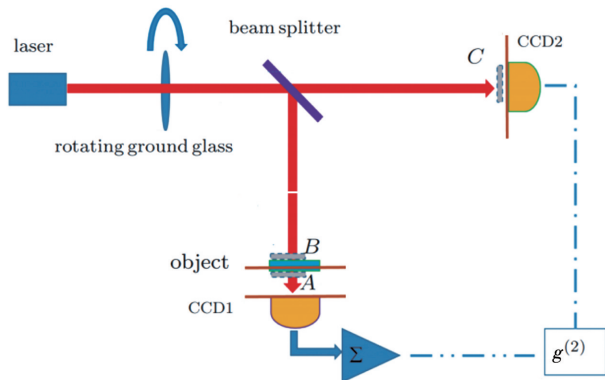


图 8 LGI 系统的示意图<sup>[45]</sup>

Fig. 8 Schematic diagram of the LGI system<sup>[45]</sup>

2020 年, Gao 等<sup>[46]</sup>基于深度学习在均匀散射介质不同位置实现了图像重建,并通过实验验证了该方法的可行性。理论模拟和实验结果均表明,散射介质位于接收路径时不会影响关联成像的重构质量,只有散射介质位于发射路径时才会影响成像结果。但上述实验均使用稳定的散射介质,而实际应用如真实的大气环境或浑浊介质中,散射介质会随时间和空间的变化而变化,因此研究动态散射介质中的关联成像可进一步提高系统的适应性和抗干扰性。

### 3.3 补偿重构算法的研究

为了提高成像质量,除了对光学系统进行优化

外,人们也研究了补偿重构算法。2016 年,庄佳衍等<sup>[47]</sup>提出了基于压缩感知成像系统的测量值线性拉伸(LTMD)算法。LTMD 算法对非线性测量值按大小分区,计算各区域的补偿系数,并根据补偿系数对非线性测量值进行线性化,最后基于压缩感知重建图像。LTMD 算法能对散射介质中的物体进行高质量重建,且当散射介质进行动态变化时,重建的图像效果更好。

当散射介质动态变化较平缓时,LTMD 算法难以对非线性测量值进行分区,必须对光强值进行逐点校正。因此,2020 年,胡洋岷等<sup>[48]</sup>提出了一种基于逐点补偿(PPC)的算法,利用特定帧的光强变化关系校正经动态散射介质后非线性衰减的光强,最终计算出未发生畸变的光强值。相比 LTMD 算法的分块线性化,PPC 算法的计算量较大,计算速度也较慢。此外,关联成像通常采集的数据量大且稀疏,为了降低采样率,Hadamard<sup>[49]</sup>、傅里叶变换、深度学习<sup>[50]</sup>等方法逐渐被人们引入关联成像实验进行算法优化,以提高重建速率。

## 4 结 论

根据近年来人们对散射介质中强度关联成像的相关研究,分析了不同散射介质、不同路径散射介质对成像结果的影响以及补偿重构算法。研究结果表明,接收路径的散射介质不会影响重建图像的质量,图像质量会随发射路径散射介质的厚度以及质量浓度的增加逐渐衰减。为了模拟大气散射,人们用不同种类的乳浊液模拟大气散射中的米散射进行实验,证明了抗散射介质关联成像系统的实用性,且相关系统已被应用于实际大气环境中,弥补了传统光学成像的不足。此外,关联成像也可被应用在水下物体成像,实现海洋资源勘探、海洋军事应用。在医学领域,关联成像技术也可实现无损伤检测等。但散射介质强度关联成像还需适应更复杂多变的环境,使其探测目标时的成像速度更快、分辨率更高、成像质量更好。

## 参 考 文 献

- [1] Zhang Z Q, Zhang Y. Light field imaging with micro lens array[J]. Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition), 2016, 37(1): 15-19.  
张占强, 张岩. 基于微透镜阵列的光场成像系统[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2016, 37(1): 15-19.
- [2] Xu Y K. Influence of atmosphere scattering on

- correlated imaging[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2014: 39-44.
- 徐耀坤. 大气散射对关联成像的影响[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2014: 39-44.
- [3] Wang Q Z, Liang X, Wang L, et al. Fourier spatial filter acts as a temporal gate for light propagating through a turbid medium[J]. *Optics Letters*, 1995, 20(13): 1498-1500.
- [4] Mujumdar S, Ramachandran H. Imaging through turbid media using polarization modulation: dependence on scattering anisotropy [J]. *Optics Communications*, 2004, 241(1/2/3): 1-9.
- [5] Wang L, Ho P P, Liang X, et al. Kerr-Fourier imaging of hidden objects in thick turbid media[J]. *Optics Letters*, 1993, 18(3): 241.
- [6] Busck J. Underwater 3-D optical imaging with a gated viewing laser radar[J]. *Optical Engineering*, 2005, 44(11): 116001.
- [7] Zhu Y C, Shi J H, Yang Y, et al. Polarization difference ghost imaging[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(6): 1279-1284.
- [8] Li M F, Mo X F, Zhang A N. The key technics in quantum imaging and its researching status [J]. *Navigation and Control*, 2016, 15(5): 1-9, 16.  
李明飞, 莫小范, 张安宁. 量子成像关键技术及研究进展[J]. *导航与控制*, 2016, 15(5): 1-9, 16.
- [9] Zhao Y, Li G L, Yang Z H. Development of quantum correlation imaging technology [J]. *Aero Weaponry*, 2017(5): 3-10.  
赵剡, 李高亮, 杨照华. 量子关联成像技术发展[J]. *航空兵器*, 2017(5): 3-10.
- [10] Brown R H, Twiss R Q. A test of a new type of stellar interferometer on Sirius [J]. *Nature*, 1956, 178(4541): 1046-1048.
- [11] Brown R H, Twiss R Q. Correlation between photons in two coherent beams of light[J]. *Journal of Astrophysics and Astronomy*, 1994, 15(1): 13-19.
- [12] Klyshko D N. Two-photon light: influence of filtration and a new possible EPR experiment [J]. *Physics Letters A*, 1988, 128(3/4): 133-137.
- [13] Shih Y H, Sergienko A V, Rubin M H, et al. Two-photon entanglement in type-II parametric down-conversion[J]. *Physical Review A, Atomic, Molecular, and Optical Physics*, 1994, 50(1): 23-28.
- [14] Pittman T B, Shih Y H, Strekalov 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.
- [15] Bennink R S, Bentley S J, Boyd R W. "Two-photon" coincidence imaging with a classical source [J]. *Physical Review Letters*, 2002, 89(11): 113601.
- [16] Zhang D, Zhai Y H, Wu L A, et al. Correlated two-photon imaging with true thermal light [J]. *Optics Letters*, 2005, 30(18): 2354-2356.
- [17] Shapiro J H. Computational ghost imaging [C] // *International Quantum Electronics Conference 2009*, May 31-June 5, 2009, Baltimore, Maryland, US. Washington, D.C.: OSA, 2009: IThK7.
- [18] Bromberg Y, Katz O, Silberberg Y. Ghost imaging with a single detector[J]. *Physical Review A*, 2009, 79(5): 053840.
- [19] Chen H, Peng T, Shih Y. 100% correlation of chaotic thermal light[J]. *Physical Review A*, 2013, 88(2): 023808.
- [20] Wang W, Wang Y P, Li J H, et al. Iterative ghost imaging[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(17): 5150-5153.
- [21] Edgar M P, Gibson G M, Bowman R W, et al. Simultaneous real-time visible and infrared video with single-pixel detectors [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 10669.
- [22] Sun M J, Edgar M P, Gibson G M, et al. Single-pixel three-dimensional imaging with time-based depth resolution[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 12010.
- [23] Hardy N D, Shapiro J H. Computational ghost imaging versus imaging laser radar for three-dimensional imaging [J]. *Physical Review A*, 2013, 87(2): 023820.
- [24] Yin L F, Wu G H, Yin P Q. Real-time displaying ghost imaging scheme: CN110132324A [P]. 2019-08-16.  
尹龙飞, 吴国华, 尹鹏起. 一种实时显示鬼成像方案: CN110132324A [P]. 2019-08-16.
- [25] Li X H, Deng C J, Chen M L, et al. Ghost imaging for an axially moving target with an unknown constant speed [J]. *Photonics Research*, 2015, 3(4): 153-157.
- [26] Song Z Y, Yang Z H, Yu Y J, et al. Tracking compensation in computational ghost imaging of the moving targets [J]. *Optical Technique*, 2019, 45(3): 343-347.  
宋政言, 杨照华, 余远金, 等. 基于追踪补偿的运动物体计算关联成像方法 [J]. *光学技术*, 2019, 45 (3): 343-347.
- [27] Magaña-Loaiza O S, Howland G A, Malik M, et al. Compressive object tracking using entangled photons [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102 ( 23 ): 231104.
- [28] Shi D F, Yin K X, Huang J, et al. Fast tracking of moving objects using single-pixel imaging [J]. *Optics*

- Communications, 2019, 440: 155-162.
- [29] Gong W L, Han S S. Correlated imaging in scattering media[J]. Optics Letters, 2011, 36(3): 394-396.
- [30] Chen M L, Li E R, Gong W L, et al. Ghost imaging lidar via sparsity constraints in real atmosphere[J]. Optics and Photonics Journal, 2013, 3(2): 83-85.
- [31] Zhang Y Z. Experimental study of correlated imaging and algorithm design[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014: 34-40.  
张银佐. 关联成像实验研究及后期解算算法设计[D]. 上海: 上海交通大学, 2014: 34-40.
- [32] Zhou C, Liu B, Huang H Y, et al. Effect of scattering medium on multi-wavelength color object correlated imaging [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(10): 101102.  
周成, 刘兵, 黄贺艳, 等. 散射介质对多波长彩色物体关联成像的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(10): 101102.
- [33] Jin H Q, Shi J H, Peng J Y, et al. Looking around corners and through turbid media with projector[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(5): 0511006.  
金浩强, 石剑虹, 彭进业, 等. 基于投影仪的“街角成像”和穿透散射介质成像[J]. 光学学报, 2014, 34(5): 0511006.
- [34] Ma Y Q, Zhang Z J, Wu C Q. Experiment study on ghost imaging in strong absorption and weak scattering media[J]. Optical Instruments, 2020, 42(1): 58-62.  
马云强, 张子进, 吴承启. 强吸收弱散射介质下的鬼成像实验研究[J]. 光学仪器, 2020, 42(1): 58-62.
- [35] Hu Y D, Cheng Z D, Liang Z Y, et al. Experimental study on laser computational ghost imaging through smoke media[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(4): 0401020.  
胡洋頔, 程正东, 梁振宇, 等. 激光关联成像在烟幕条件下的实验研究[J]. 中国激光, 2021, 48(4): 0401020.
- [36] Zhong S C, Li Z R, Wang R B. Forward-scattering effect on underwater laser imaging[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(1): 61-64.  
钟森城, 李泽仁, 王荣波. 前向散射对激光水下成像的影响[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(1): 61-64.
- [37] Zhao M J. Research on underwater polarization-based ghost imaging[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2019: 33-39.  
赵美晶. 水下偏振鬼成像方法研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2019: 33-39.
- [38] Zhao M, Wang Y, Tian Z M, et al. Method of push-broom underwater ghost imaging computation [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(16): 161101.  
赵明, 王钰, 田芷铭, 等. 水下推扫式计算鬼成像的方法[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(16): 161101.
- [39] Yin M Q. Underwater ghost imaging of amplitude and phase objects[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2020: 26-36.  
殷曼倩. 水下振幅物体和相位物体的鬼成像方法研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2020: 26-36.
- [40] Bina M, Magatti D, Molteni M, et al. Backscattering differential ghost imaging in turbid media [J]. Physical Review Letters, 2013, 110(8): 083901.
- [41] Durán V, Soldevia F, Irlles E, et al. Imaging at depth in tissue with a single-pixel camera[EB/OL]. (2014-11-11) [2021-03-02]. <http://arxiv.org/abs/1411.2731>.
- [42] Liu B L, Yang Z H, Qu S F, et al. Influence of turbid media at different locations in computational ghost imaging [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(10): 1026017.  
刘保磊, 杨照华, 曲少凡, 等. 不同路径下散射介质对计算关联成像的影响[J]. 光学学报, 2016, 36(10): 1026017.
- [43] Li W, Yang Z H, Chen X, et al. Research on super-resolution anti-interference detection system based on active and passive quantum correlation imaging [J]. Navigation and Control, 2020, 19(1): 34-39, 96.  
李旺, 杨照华, 陈香, 等. 基于主被动量子关联成像的超分辨抗干扰探测系统研制[J]. 导航与控制, 2020, 19(1): 34-39, 96.
- [44] Yang Z H, Li W. Experimental study on the influence of scattering media on intensity correlation imaging[J]. Physics and Engineering, 2020, 30(3): 79-83, 88.  
杨照华, 李旺. 散射介质对强度关联成像影响的教学实验研究[J]. 物理与工程, 2020, 30(3): 79-83, 88.
- [45] Yang Z, Zhao L J, Zhao X L, et al. Lensless ghost imaging through the strongly scattering medium[J]. Chinese Physics B, 2016, 25(2): 024202.
- [46] Gao Z Q, Cheng X M, Chen K, et al. Computational ghost imaging in scattering media using simulation-based deep learning [J]. IEEE Photonics Journal, 2020, 12(5): 1-15.
- [47] Zhuang J Y, Chen Q, He W J, et al. Imaging through dynamic scattering media with compressed sensing [J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(4): 040501.  
庄佳衍, 陈钱, 何伟基, 等. 基于压缩感知的动态散射成像[J]. 物理学报, 2016, 65(4): 040501.
- [48] Hu Y D, Cheng Z D, Liang Z Y, et al. Computational ghost imaging using a dynamic

scattering medium by the point-by-point compensation method[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(20): 201106.

胡洋頔, 程正东, 梁振宇, 等. 基于逐点补偿方法的动态散射成像[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(20): 201106.

[49] Gao Z J, Yin J H, Bai Y F, et al. Imaging quality

improvement of ghost imaging in scattering medium based on Hadamard modulated light field[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(27): 8472-8477.

[50] Li F Q, Zhao M, Tian Z M, et al. Compressive ghost imaging through scattering media with deep learning[J]. *Optics Express*, 2020, 28(12): 17395-17408.