

关联成像技术研究现状及展望

吴自文, 邱晓东, 陈理想*

厦门大学物理科学与技术学院物理学系, 福建 厦门 361005

摘要 关联成像以其非定域性、抗干扰能力强等特点得到研究人员的广泛关注, 在三维成像、遥感成像、生物医疗、国防军事等领域具有广阔的应用前景。本综述根据发展阶段的不同, 详细介绍了纠缠双光子关联成像、(赝)热光关联成像和计算关联成像的发展历程及应用现状, 尤其是近年来微光相机 (ICCD) 的出现为关联成像发展带来的促进作用及最新进展。针对热光关联成像的物理本质进行了简单的讨论, 对关联成像的实际应用进行了展望。

关键词 成像系统; 关联成像; 计算成像; 成像理论; 成像质量

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP57.060001

Current Status and Prospect for Correlated Imaging Technique

Wu Ziwen, Qiu Xiaodong, Chen Lixiang*

Department of Physics, College of Physical Science and Technology, Xiamen University,
Xiamen, Fujian 361005, China

Abstract Correlated imaging has attracted noteworthy attention due to the advantages in non-local property, strong anti-interference capability, *etc.* And it has wide applications in three-dimensional imaging, remote sensing, biomedical technique, and national defense and military. In this paper, according to different stages of development, we introduce the development history and applications of the entangled two-photon correlated imaging, (pseudo) thermo-optical correlated imaging, and computational correlated imaging, especially focusing on the improvement arising from the ICCD camera. Also, we briefly discuss the physical nature of the thermo-optical correlated imaging. Finally, we give a pithy view of the practical applications.

Key words imaging system; correlated imaging; computational imaging; imaging theory; imaging quality

OCIS codes 100.2960; 110.3010; 110.1758; 110.2990

1 引言

作为光学研究领域的一部分, 光学成像在理论研究和日常生活中都发挥了重要的作用。传统的光学成像方式是利用光场的一阶关联来获得物体的信息, 如显微镜、照相机、望远镜等。而关联成像则是利用光场的高阶关联来获得物体的空间或相位分布信息, 其成像过程如下。光源发出的光经过分束器分成测试光路和参考光路, 其中: 测试光路中放置物体, 并在物体后面使用不具有空间分辨率的桶(点)探测器接收信号; 参考光路中不放置物体, 光直接照

射到具有空间分辨率的探测器上。由于桶(点)探测器不具有空间分辨率, 而具有空间分辨率的探测器没有接触物体, 因此仅通过单路探测器的输出都不能单独得到物体信息, 但通过对两路输出信号进行符合计算可恢复物体的信息。这种成像方法实现了探测和成像的分离, 是一种非定域的成像方式, 即离物成像, 故也被称为鬼成像。

关联成像的理论基础是关联测量或者符合测量原理, 最初是由 Hanbury Brown 和 Twiss 提出并应用^[1-2]。为了测量恒星的角直径, 他们使用了基于光场二阶相干性的强度干涉仪。与基于光场一阶相干

收稿日期: 2019-03-04; 修回日期: 2019-05-25; 录用日期: 2019-04-26

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划培育项目(91636109)、教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-13-0495)、福建省杰出青年基金(2015J06002)、厦门大学校长基金(20720190057)

* E-mail: chenlx@xmu.edu.cn

性的迈克耳孙恒星干涉仪相比, HBT (Handury Brown-Twiss) 实验的抗干扰能力更强, 不易受到大气湍流的影响。符合测量方法在量子光学的发展中具有重要的意义, 为关联成像技术的发展作出了重大的贡献。本文将从历史、现状、应用, 以及发展趋势等方面对关联成像技术作进一步的回顾与探讨。

2 关联成像的发展过程

对应于不同的发展阶段, 关联成像主要分为三类: 纠缠双光子关联成像, (赝) 热光关联成像, 以及计算关联成像。

2.1 纠缠双光子关联成像

1935 年, Einstein 等^[3] 为了证明量子力学的不完备性, 提出了著名的“EPR 佯谬”, 从此, 量子纠缠的概念逐渐进入人们的视野。1988 年, Klyshko^[4] 从理论上提出了基于纠缠光子对的关联成像方案。1994 年, Ribeiro 等^[5] 利用纠缠光子对发现了鬼干涉现象。

1995 年, Pittman 等^[6] 在实验上实现了纠缠双光子关联成像。实验装置如图 1 所示, 使用波长为 351.5 nm 的氩离子激光器作为光源, 抽运 BBO (beta barium borate) 晶体, 使晶体发生自发参量下转换过程, 产生的纠缠光子对经过偏振分束器 (PBS) 分成两路: 1) 信号 (signal) 光先通过透镜, 再透过物体经收集透镜会聚到无空间分辨率的桶探测器 D_1 中; 2) 闲置 (idler) 光自由传播, 使用探测器 D_2 对该光路横截面进行扫描得到空间分布信息。该实验可以用双光子的纠缠性质来解释, 两路光子存在坐标、动量纠缠, 于是可以将信号光路和闲置光路简化到同一直线上进行分析。将物体到透镜的距离当作物距, 设为 S , 把 BBO 晶体到探测器 D_2 的距离和 BBO 晶体到透镜的距离之和看作是像距, 设为 S' , 关联成像的 Klyshko

几何光路图如图 2 所示, 该系统同样满足高斯成像公式: $1/S + 1/S' = 1/f$, 其中 f 为透镜的焦距。实验结果表明, 对两条光路进行单独测量都无法得到物体的信息, 只有对两路计数率进行符合测量才可以恢复出物体的图像, 实验结果如图 3 所示。

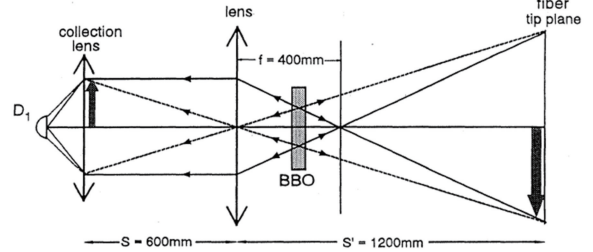


图 2 Klyshko 几何光路图^[6]

Fig. 2 Klyshko geometric optical path diagram^[6]

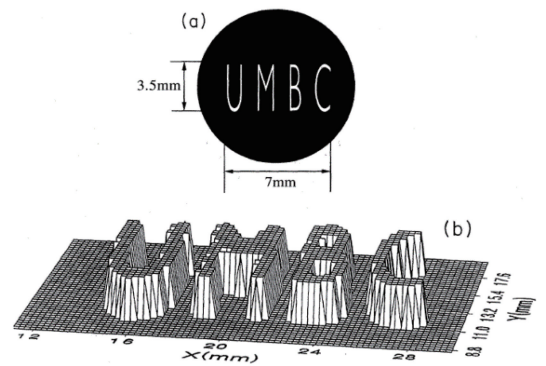


图 3 关联成像实验结果。(a) 信号光路中的物体; (b) 光纤横截面坐标下的计数率^[6]

Fig. 3 Experimental results of correlated imaging. (a) Object in the signal beam; (b) counts rate as a function of the fiber tip's transverse plane coordinates^[6]

在实现关联成像后不久, Strekalov 等^[7] 又实现了纠缠双光子的鬼干涉和鬼衍射实验。1996 年, Barbosa^[8] 完成了纠缠光子的双缝实验。1999 年, Fonseca 等^[9] 利用四阶杨氏双缝干涉实验测得了纠缠光子对的德布罗意波长。同年, Fonseca 等^[10] 又利用纠缠光实现了非定域的双缝干涉实验。2000 年, Boto 等^[11] 在理论上提出了基于多光子纠缠的量子光刻方案, 该方法可以提高关联成像的分辨率。2001 年, D'Angelo 等^[12] 利用自发参量下转换产生的纠缠光子对实现了量子光刻实验。量子光刻具有亚波长干涉特征, 证明了关联成像具有更高的分辨率。此后, 对纠缠双光子关联成像分辨率的研究引起了科研工作者的广泛兴趣^[13-14]。一开始, 关联成像实验使用的物体都是纯振幅物体。

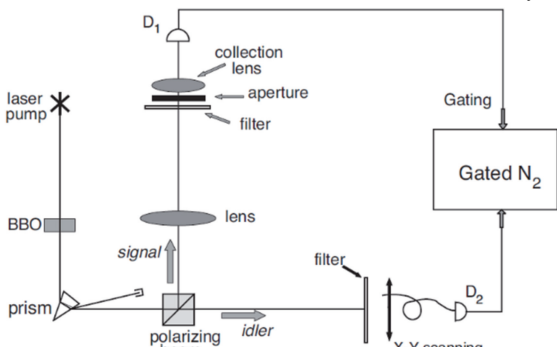


图 1 纠缠双光子关联成像实验示意图^[6]

Fig. 1 Schematic of entangled two-photon correlated imaging^[6]

2004年, Abouraddy等^[15]利用纠缠光实现了纯相位物体的关联成像,这使得将关联成像技术应用到更为复杂的物体成为可能。

研究者还利用关联成像技术研究了量子力学的一些基本问题。1999年, Kim等^[16]通过纠缠双光子关联成像在实验上实现了Popper思想实验。2004年, D'Angelo等^[17]利用量子的鬼干涉和鬼成像实验研究了量子纠缠问题,验证了自发参量下转换产生的光子对具有动量和位置关联,满足EPR(Einstein-Podolsky-Rosen)不等式。2009年, Jack

等^[18]使用如图4所示的装置开展实验,抽运光经过BBO分成两路之后分别经过两个空间调制器(SLM),一个SLM用于产生物体相位,一个SLM用作相位滤波器,然后对两路进行关联。图5为相位滤波器角度取向分别为 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ 时,符合计数随方位角变化的实验数据。基于Clauser-Horne-Shimony-Holt(CHSH)型Bell不等式,通过计算可知,该实验的Bell参数 $S_1 = 2.69 \pm 0.10$,超出了 $-2 \leq S_1 \leq 2$ 的范围,从而Bell不等式的违背实验得以验证。

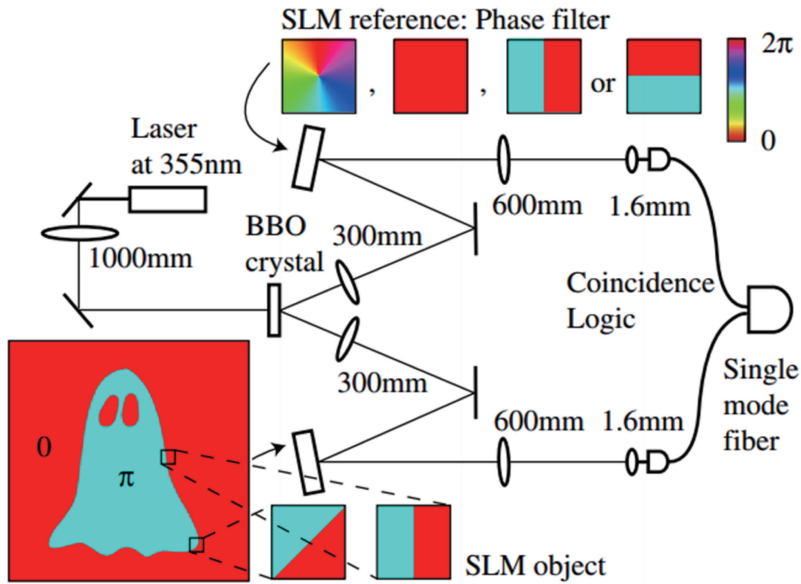


图4 Bell不等式的违背实验装置图^[18]

Fig. 4 Experimental setup of the violation of Bell inequality^[18]

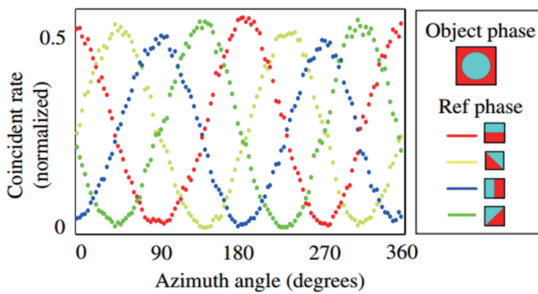


图5 Bell不等式的违背实验结果(参考光路中相位滤波器角度取向分别为 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ 时,符合计数随方位角变化的正弦曲线^[18])

Fig. 5 Experimental result of violation of Bell inequality (sinusoidal patterns of coincidence counts when orientations of phase filter in reference optical path are $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$, and 135° , respectively^[18])

微光相机ICCD(intensified charge coupled device)的使用使得关联成像,特别是纠缠双光子关联成像,进入了新的发展阶段。2013年,Aspden

等^[19]利用ICCD完成了EPR鬼成像实验,克服了单像素扫描的局限性。随后, Morris等^[20]在2015年进一步优化了上述系统,完成了少光子甚至单光子水平的关联成像实验,实验装置如图6所示。用355 nm波长的激光抽运BBO晶体发生自发参量下转换过程,产生波长为710 nm的两路纠缠光子,一路经过物体被单光子探测器收集,当单光子探测器探测到光子时触发ICCD拍摄另一路光。由于在触发ICCD的过程中会引入约70 ns的时间延迟,为了保证单光子探测器接收到的光子和ICCD拍摄到的光子来源于一对关联的光子对,搭建了一套长约22 m的自由空间延迟光路。考虑到关联成像主要基于双光子的空间模式纠缠特性,在延迟光路中采用了一系列的 $4f$ 成像系统。实验中,BBO的像面与物体以及ICCD平面重合。图7是在不同光子数的情况下,分别利用不同的正则因子 λ 值重构的黄蜂翅膀图像,通过使用ICCD实现了少光子关联

Full experimental schematic

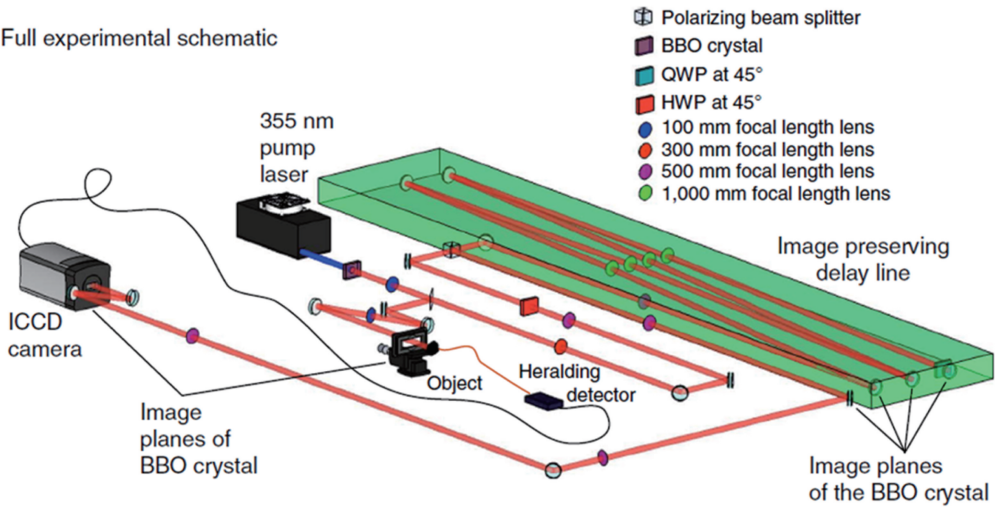


图 6 少光子成像实验装置图^[20]

Fig. 6 Experimental setup of imaging with less photons^[20]

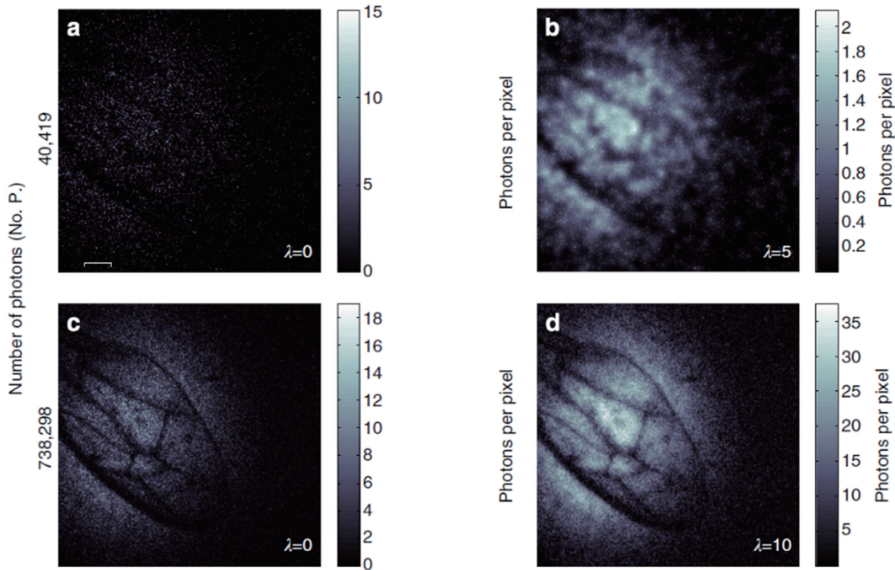


图 7 黄蜂翅膀的重构图。(a)40419 个光子探测的黄蜂翅膀图像;(b)与(a)对应的 $\lambda=5$ 的重构图;

(c) 738298 个光子探测的黄蜂翅膀图像;(d)与(c)对应的 $\lambda=10$ 的重构图^[20]

Fig. 7 Reconstructed images of a wasp wing. (a) Image of wasp wing using 40419 detected photons; (b) reconstructed image corresponding to Fig. 7(a) when $\lambda=5$; (c) image of the same wasp wing using 738298 detected photons; (d) reconstructed image corresponding to Fig. 7(c) when $\lambda=10$ ^[20]

成像。该成果在生物医学领域具有很大的应用前景。随后,Aspden 等^[21]基于纠缠光关联成像,利用少光子实现了纯相位物体的非定域边缘增强成像,一路 SLM 产生物体相位,一路 SLM 加载轨道角动量(OAM) $l=1$ 的全息光栅作为相位滤波器。该成像系统只需要 7300 个光子就能够识别出物体,具有很大的应用价值。

Rubin 等^[22-23]提出了双色关联成像的概念,随后这一概念在实验上得以实现^[24]。2015 年,

Aspden 等^[25]基于双色关联成像方案,使用 ICCD 在实验上实现了稀疏光子的显微技术,实验装置如图 8 所示。355 nm 的抽运光经过 BBO 之后形成纠缠双光子对,闲置光路中的光子为 1550 nm 波长的红外线,信号光路中是波长为 460 nm 的光子。该实验利用不可见的红外光照射物体,最后却能够用可见光进行成像,实验结果如图 9 所示。这使得将不可见光的情形转化到可见光范围内成像成为可能,具有可观的应用前景。

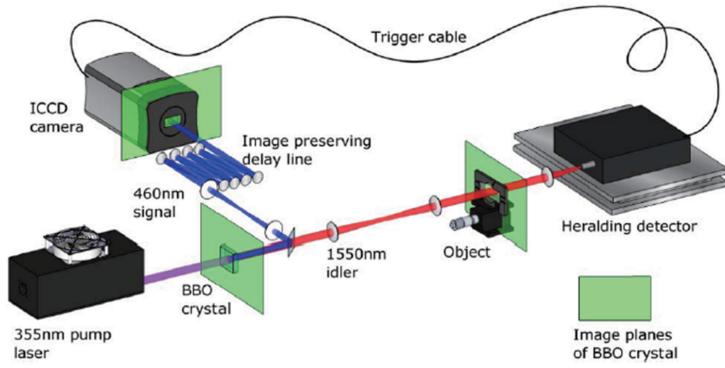


图 8 稀疏光子显微实验装置图^[25]

Fig. 8 Setup of photon-sparse microscopy experiment^[25]

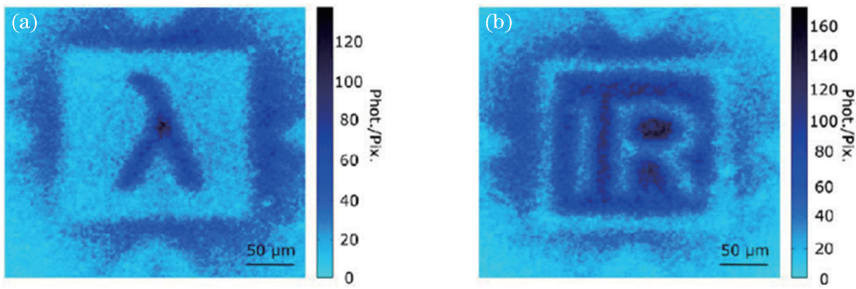


图 9 稀疏光子显微实验结果^[25]

Fig. 9 Result of photon-sparse microscopy experiment^[25]

近年来,将 OAM 与量子关联成像技术相结合也是研究的热点之一。如:Li 等^[26]利用 OAM 深入研究了关联成像中彩色物体的编码技术;Uribe-Patarroyo 等^[27]第一次将纠缠轨道角动量态应用到物体识别测量中。

基于 OAM 的关联成像也是本课题组研究的重点之一,本课题组于 2010 年在实验上定量确定了非定域杨氏双缝鬼衍射的高维量子特性^[28]。该实验使用两个 SLM,分别加载开口方向不同的信号掩模(signal mask)和闲置掩模(idler mask),证明了非定域的杨氏角双缝实验结果与杨氏角双缝实验结果一致,表征了纠缠系统的维度,有望应用于量子信息协议等领域。2014 年,Chen 等^[29]将高维轨道角动量纠缠关联成像与数字螺旋成像(DSI)技术相结合,实验装置如图 10 所示。通过在 SLM1 上加载需要的相位物体,将 SLM2 作为轨道角动量探针,在实验上成功探测和识别了分数涡旋的纯相位物体,并获得了相位物体非定域的轨道角动量螺旋谱,结果如图 11 所示,其中: M 为物体所携带的分数拓扑荷数,空心柱代表理论值,实心柱代表实验值。该技术可以应用于非定域遥感、探测和纯相位物体表征等领域。

2.2 (赝)热光关联成像

关于(赝)热光关联成像,国内已经有一些研究成果^[30-32],这里仅进行简单的回顾,并介绍新的热光关联成像与 OAM 结合的成果。

因为起初采用纠缠光源进行关联成像,所以鬼成像、鬼衍射、亚波长干涉等效应一度被认为是量子纠缠特有的性质。2001 年,Abouraddy 等^[33]提出,量子纠缠是实现关联成像的先决条件,而其他光源是无法模拟的。于是,关于经典光源能否实现关联成像成为研究者们普遍关心的一个热点问题。2002 年,Bennink 等^[34]通过将激光打到一个随机旋转的反射镜上,实现了经典光源的关联成像,从而否定了量子纠缠是实现关联成像的前提条件的假说。随后,研究人员在实验上对比了纠缠光源和经典光源在近场和远场下的关联成像,发现纠缠关联成像的分辨率是经典光源关联成像的 3 倍^[35]。2004 年,Cheng 等^[36]基于经典相干性理论证明了经典热光场关联成像的可行性。随后,Gatti 等^[37-38]在量子相干性理论框架下分析了基于量子 and 经典光源的关联成像的异同,证明使用非相干的热光源也可以实现关联成像。从此,热光关联成像引起研究者的强烈兴趣。2005 年,Valencia 等^[39]在实验上利用赝热光源实现

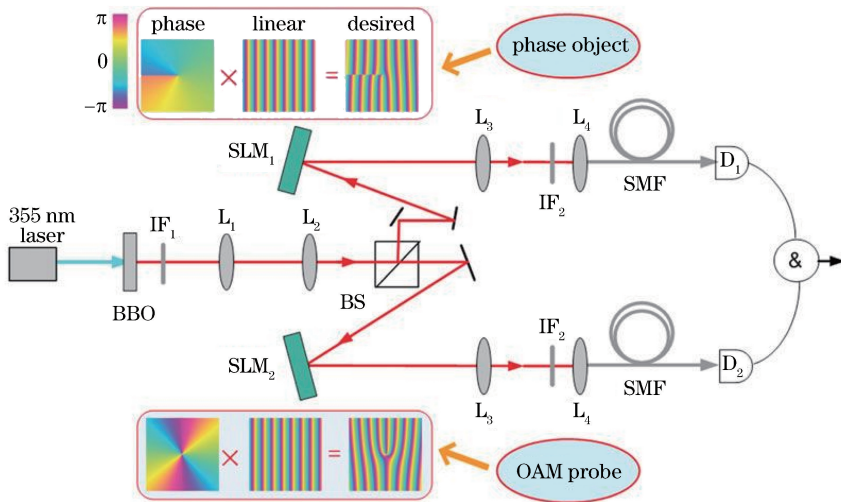


图 10 量子数字螺旋成像实验装置图^[29]

Fig. 10 Experimental setup of quantum digital spiral imaging^[29]

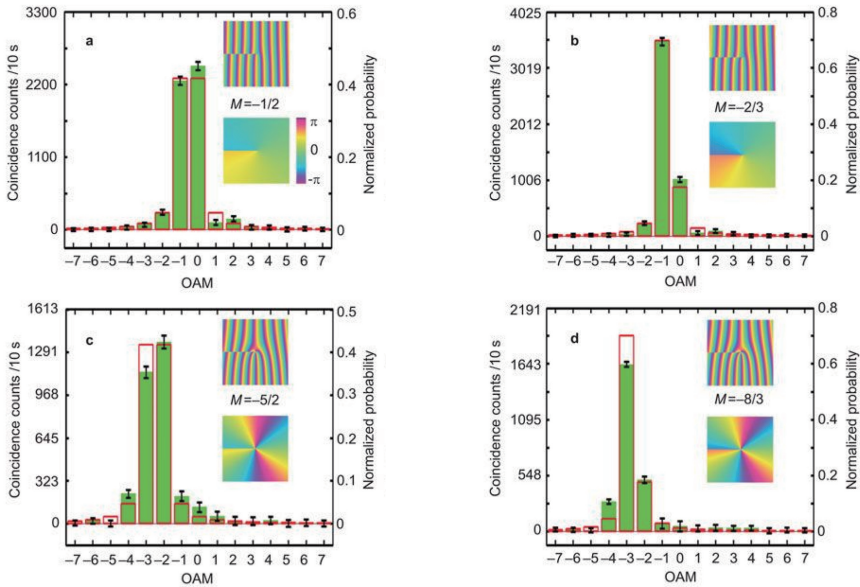


图 11 不同分数拓扑荷数的量子数字螺旋成像结果^[29]。(a) $M = -1/2$; (b) $M = -2/3$; (c) $M = -5/2$; (d) $M = -8/3$

Fig. 11 Results of quantum digital spiral imaging^[29] for different fractional topological charges.

(a) $M = -1/2$; (b) $M = -2/3$; (c) $M = -5/2$; (d) $M = -8/3$

了热光关联成像。同年, Xiong 等^[40]在实验上观察到了基于热光的经典亚波长双缝干涉现象。

2004 年, Cheng 等^[36]在理论上提出了非相干光无透镜傅里叶变换成像系统, 并预言了该系统在 X 射线衍射方面的应用价值。随后, 研究人员通过一系列实验对无透镜关联成像进行了验证^[41-42]。2005 年, Cao 等^[43]在深入研究双光子关联成像和热光关联成像的基础上提出了无透镜关联成像。2006 年, Scarcelli 等^[44]在实验上实现了无透镜的热光关联成像, Basano 等^[45]对该实验和理论进行进一步的探讨。Zhang 等^[46-48]使用空心阴极灯作为光

源, 相继实现了真热光源的关联成像、亚波长干涉和无透镜关联成像。2008 年, Meyers 等^[49]通过收集经过物体散射和发射的光子取代传统实验中穿过物体的透射光子, 实现了反射型无透镜热光关联成像, 这使得关联成像具有更大的实用价值。2012 年, Karmakar 等^[50]利用太阳光完成了关联成像实验。随后, Liu 等^[51]在实验上使用太阳光实现了无透镜关联成像。

在相位物体的热光关联成像方面: 2006 年, Bache 等^[52]在实验上实现了相位物体的非相干光鬼衍射成像; 2010 年, Gong 等^[53]基于非相干光提出

了相位物体的关联成像理论；2014年，Zhang等^[54]基于该理论在实验上使用赝热光实现了相位物体的无透镜关联成像。

近年来，研究人员还尝试将热光关联成像应用到其他领域。2012年，Liu等^[55]将热光关联成像与光学相干层析成像相结合，在实验上实现了热光的光学相干层析关联成像。2016年，Magaña-Loaiza等^[56]使用数字微镜设备(DMD)产生携带随机相位的涡旋赝热光源，将OAM量与HBT实验相结合，实验装置如图12所示。激光经过加载随机相位屏的DMD反射形成赝热光场，再经过分束镜(BS)分成两路，一路中的SLM加载角掩模和相位光栅，另一路SLM加载不同OAM值(-15~15)的叉形光栅，最后两路光束分别经过会聚透镜被

收集到单光子探测器中用于符合测量，实验结果如图13所示。实验研究了光源相干长度 r_0 分别为210, 150, 70 nm情形下的一阶杨氏干涉 OAM谱(A~D)，以及二阶 HBT干涉 OAM谱(E~H)，从图中可以看出，二阶关联对光源的相干长度不敏感，可以更好地表征物体。该成果在信息科学、遥感、成像、天文、度量衡学等领域均具有广阔的应用前景。2017年，Gao等^[57]基于赝热光实现了非定域的角双缝掩模干涉实验。同年，研究人员在实验上验证了利用随机光的OAM关联可以识别具有旋转对称性的物体的空间和相位信息^[58]。2018年，研究人员通过将热光关联成像与Abbe-Porter滤波成像技术相结合，完成了非定域的空间滤波成像实验^[59]。

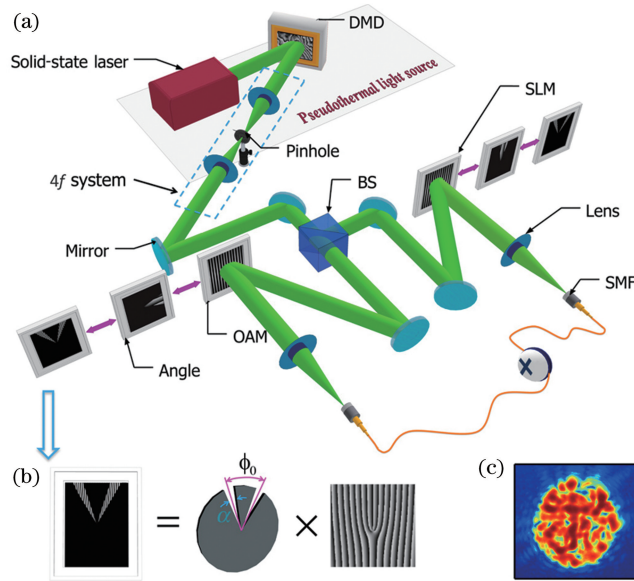


图12 涡旋光 Hanbury Brown-Twiss (HBT)干涉实验。(a)实验装置图；(b) SLM上的全息图；(c)赝热光场^[56]

Fig. 12 HBT interferometry with vortex light. (a) Experimental setup; (b) hologram displayed on SLM; (c) pseudothermal beam^[56]

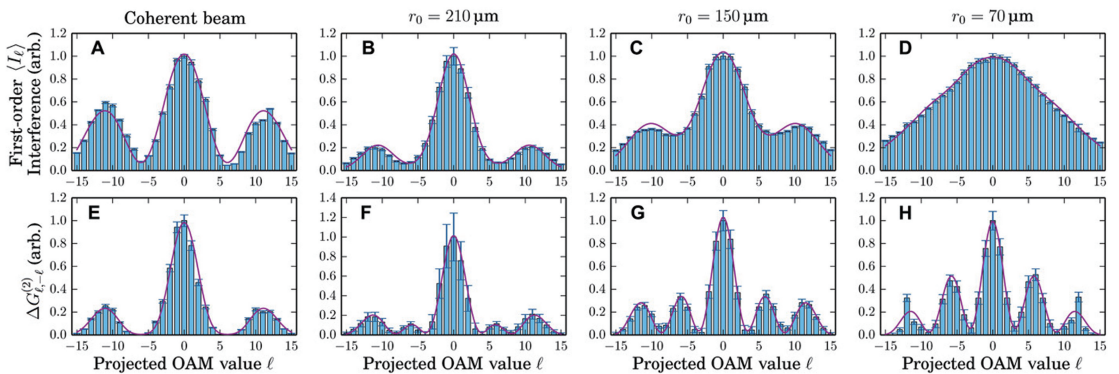


图13 不同相干度下涡旋光 HBT干涉的实验结果。(a)~(d)一阶杨氏干涉；(e)~(h)二阶 HBT干涉^[56]

Fig. 13 Experimental results of HBT interferometry with vortex light under different coherent degrees.

(a)-(d) first-order Young interference; (e)-(h) second-order HBT interference^[56]

2.3 计算关联成像

传统的关联成像具有物像分离的优点,但是在实验过程中必须搭建信号光路和参考光路进行关联测量,使得实验的操作和程序繁杂。2008年,Shapiro^[60]从理论上提出了计算关联成像方案,使得单路的关联成像成为可能。其主要设计思路来源于对热光关联成像系统的修改和发展^[60-61]。首先,将散斑图加载到SLM或者DMD上产生随机热光场,替代传统热光关联成像中透过旋转的毛玻璃产生的热光源,热光经BS分开后,都在自由空间传播相同的距离,信号光路透过物体被桶探测器收集,参考光路使用点探测器进行空间扫描,最后对两路的信号进行符合测量得到关联成像结果。因为加

载到SLM或者DMD上的相位是人为调制的,所以从已知的散斑图上可以从理论上计算得出参考光路的信息,从而可以省略参考光路。

2009年,Bromberg等^[62]在实验上实现了计算关联成像。同年,Katz等^[63]将图像处理领域的压缩感知技术与计算关联成像相结合,提出压缩感知关联成像(CGI),大大缩减了关联成像所需要的采集样本。2013年,Hardy等^[64]在计算关联成像理论的基础上进一步提出了三维关联成像,并将计算关联成像技术与激光雷达技术进行了比较。同年,Sun等^[65]利用不同位置的单像素探测器实现了物体的三维关联成像,随后又实现了对物体的三维彩色成像,实验装置如图14所示。

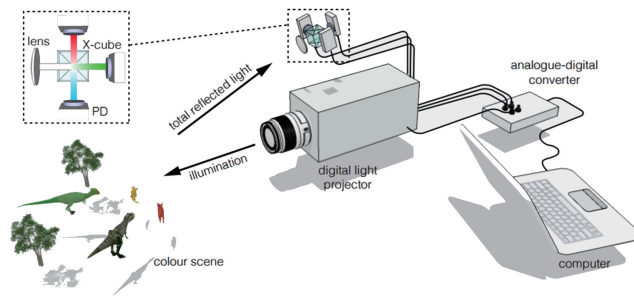


图 14 三维彩色计算关联成像实验装置图^[66]

Fig. 14 Experimental setup of 3D full-color computational correlated imaging^[66]

实验中,光源由数字光投影仪(DLP)提供,其中包含DMD和三色LED,光源发出的光经过彩色物体的反射光经过透镜会聚到二色分光镜X-Cube分成红绿蓝三束,然后被三个单像素光电探测器接收。实验结果如图15所示,分别获得了红色、绿色和蓝色的3D重构图,并最后合成彩色3D重构图^[66]。2016年,Sun

等^[67-68]将压缩感知技术应用到三维关联成像实验中,实现了实时的3D视频。同年,Devaux等^[69]完成了时间信号的计算关联成像实验。2019年,Edgar等^[70]在*Nature Photonics*上发表综述文章,详细介绍了单像素计算关联成像的原理,及其在气体泄漏可视化分析、自动驾驶汽车3D遥感等方面的应用潜力。

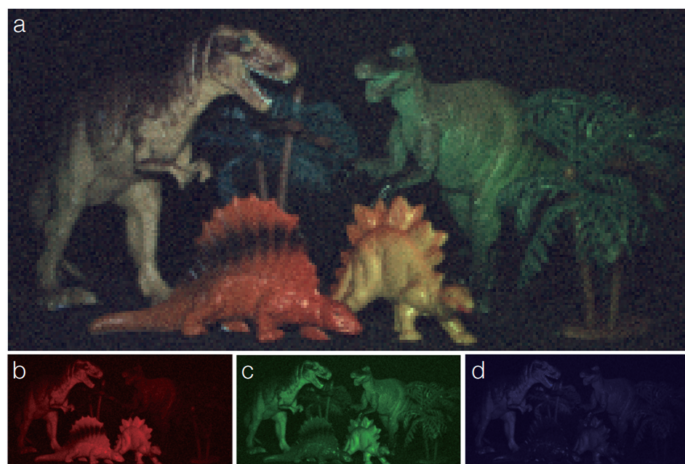


图 15 三维彩色计算关联成像实验结果。(a)彩色重构图;(b)红色重构图;(c)绿色重构图;(d)蓝色重构图^[66]

Fig. 15 Experimental results of 3D full-color computational correlated imaging. (a) Full-color reconstruction; (b) red reconstruction; (c) green reconstruction; (d) blue reconstruction^[66]

2.4 关联成像的物理本质

随着关联成像技术的发展,研究人员也提出了很多理论试图去解释这种奇特的实验现象。Scarcelli 等^[44]对比了热光和双光子关联成像的实验现象之后得出纠缠光源相当于一面镜子,而热光源类似于一面相位共轭的镜子的结论。Padgett 等^[71]采用 Klyshko 模型直观地解释了关联成像,认为二者是等价的,只不过事件发生的时间序列不同。此外,Cao 等^[43, 72-74]利用傅里叶变换解释了远场的热光关联成像。

Shih 等^[75-80]对关联成像的物理本质是量子的双光子非定域干涉还是经典的强度涨落关联进行了深入的探讨。他们将利用纠缠光和(赝)热光作为光源的关联成像分别称为 I 型关联成像和 II 型关联成像,认为 I 型关联成像是由于相长-相消干涉导致了不可分解的点对点成像关联,其二阶关联函数为

$$G^{(2)}(\boldsymbol{\rho}_o, \boldsymbol{\rho}_i) \approx \delta(\boldsymbol{\rho}_o + \boldsymbol{\rho}_i/m), \quad (1)$$

式中: $\boldsymbol{\rho}_o$ 、 $\boldsymbol{\rho}_i$ 分别对应物面和像面横截面的二维向量; $m = s_i/s_o$, s_i 、 s_o 分别对应 Klyshko 图中成像透镜到物面和像面的距离; δ 为狄拉克函数。II 型关联成像则是由双光子振幅叠加导致的不可分解的点对点成像关联,其二阶关联函数为

$$G^{(2)}(\boldsymbol{\rho}_o, \boldsymbol{\rho}_i) \approx 1 + \delta(\boldsymbol{\rho}_o - \boldsymbol{\rho}_i). \quad (2)$$

一种观点认为,上述两种不可分解的点对点成像系统都是属于量子层面的,只有可分解的散斑对散斑关联成像才是经典的,且不具有非定域的特征。

另一种观点认为,光本质上就是量子的,所以光学成像现象都是以量子力学为基础的。当照射的光源是相干态或者相干态的随机混合时,利用半经典光电探测理论和量子光电探测理论得到的定量预测结果是一致的。因此对于经典态的光和经典成像或者量子成像的定义需要更加谨慎。Shapiro 等^[78]定义了经典态:对于一个态,如果它的量子光电探测统计结果与利用合适随机过程的半经典光电探测得到的结果一致,那么这个量子态是经典的。此外,他们还定义了经典和量子成像:如果测量统计可以用半经典光电探测理论正确描述,那么这个关联成像框架就是经典的;如果测量统计需要用量子光电探测理论正确描述,那么这个关联成像框架就是量子的。理想的激光产生的相干态,无论通过真空、大气、光纤、透镜、分束器、毛玻璃等哪种介质,光束都仍然保持在经典态的范畴里;因此,赝热光是一种经典态的光。综上,I型和II型关联成像都是光量子通量密度互协方差行为的结果,是经典的相干传播。

对于热光关联成像的本质问题,本课题组也进行了一些研究和探讨^[81]。利用 OAM 本征态构建的 Hilbert 空间中的密度矩阵来描述热光关联成像中的双光子态,即

$$\hat{\rho} = \hat{\rho}_c + \hat{\rho}_q, \quad (3)$$

式中: $\hat{\rho}$ 为双光子态的密度矩阵; $\hat{\rho}_c$ 表示一个对角线分离的态; $\hat{\rho}_q$ 为数学上等价于一个高维的轨道角动量纠缠态。除去背景 $\hat{\rho}_c$ 后, $\hat{\rho}$ 与纠缠双光子关联成像相同。但是从本质上来讲,描述热光双光子的密度矩阵不是纠缠的。上述工作只是给人们提供了一个数学上精确、物理上直观的图像,便于理解热光关联成像。

3 关联成像研究方法的发展

纵观关联成像的发展历程可以看出,人们对关联成像的研究经历了纠缠双光子关联成像、(赝)热光关联成像和计算关联成像 3 个重要阶段。纠缠双光子关联成像背景噪声小,但纠缠光源的制备难度高,且外界因素如杂光、仪器的暗噪声等容易影响成像的质量,因此对实验的环境要求较高。(赝)热光关联成像的光源更容易获得,甚至可以直接利用太阳光进行实验,这使得其更具应用价值。但(赝)热光关联成像在实验过程中存在分辨率和对比度相互矛盾的问题,降低了图像的信噪比。在(赝)热光关联成像中,光源的尺寸和距离决定了光场的散斑(或横向相干面积),散斑越小,分辨率越高,但会减低图像的对比度;散斑越大,对比度越高,但此时分辨率又会降低。计算关联成像中,可以通过调制 SLM 或者 DMD 产生强度涨落光场作为光源。但是,经过 SLM 或 DMD 反射之后的光场会发生变换,从而给系统带来噪声。

关联成像相对于传统的基于光场一阶关联的成像技术有着明显不同的特性,可以和传统成像形成有益的互补,实现传统成像难以(或无法)实现的功能,但同时也存在着一些不足。因此,对关联成像系统本质的探讨和对高性能关联成像技术的改进成为了深入研究的重点。

相比于传统成像技术,关联成像具有非定域性的特点。此外,由于关联的特性,其抗干扰能力更强,可有效抑制大气湍流对成像质量的影响^[82-83]。但是,关联成像也存在着明显的局限和不足:1)图像信噪比低;2)成像时间(探测时间和后期解析时间)比较长;3)对复杂物体的还原程度还不够高。这些

因素都影响着关联成像系统的成像质量,制约了关联成像技术实用化的进程。

Cai 等^[84-86]研究了光源的横向尺度 σ_1 和横向相干长度 σ_g 对热光关联成像的影响,之后发现通过减小光源大小、增大光源的横向相干长度可以提高成像的可见度。2007 年,Ou 等^[87]提出了三阶关联成像。随后,Bai 等^[88]理论研究了经典非相干光的三阶关联鬼成像,并讨论了三阶关联成像和二阶关联成像之间的异同。2008 年,Cao 等^[89]分析了高阶关联成像系统中的成像分辨率和对比度。2010 年,Chen 等^[90]在实验上实现了高阶强度的关联成像,并发现随着强度关联阶数的增加,关联成像的对比度越来越高。量子关联成像依赖于信号光和闲置光的空间或者动量关联,具有分辨率极限^[91]。为了提高图像的分辨率,Rubin 等^[22-24]研究了纠缠光源下的双色关联成像对成像分辨率的影响,Zhang 等^[92]研究了经典光源的多色(多波长)关联成像系统在提高成像分辨率方面的作用。

一般地,关联成像采集的数据量大且稀疏。为此,Katz 等^[63]于 2009 年将信息处理领域的压缩感知算法引入计算关联成像,通过同时进行采样和压缩,大大提高了成像速度。随后,Zerom 等^[93]将压缩感知技术引入纠缠光关联成像实验。Ferri 等^[94]在 2010 年采用差分关联成像技术,有效降低了重构图像的背景噪声,提高了信噪比。2012 年,Sun 等^[95]提出了归一化关联成像,并与传统关联成像和差分关联成像进行了比较。Luo 等^[96]提出分组对应成像方案,该方案不需要进行符合测量,同时只需要两臂一部分的信号即可重构图像,提高了成像速率。2013 年,Li 等^[97-98]又将分组对应成像和差分关联成像相结合,提出了时间对应差分关联成像,以及改进后的双阈值快速时间对应关联成像,大大提高了系统的成像质量。2014 年,Zhao 等^[99]基于上述三种成像方案,提出了基于压缩感知的对应归一化关联成像方案,减少了采集样本量,缩减了重构时间。2015 年,Sun 等^[100]利用正负关联实现了反射型物体的非定域成像,该系统可以有效克服噪声的影响,并且需要更小的采集数目。2016 年,Wang 等^[101]通过快速 Walsh-Hadamard 变换快速重构了高质量的关联成像。2017 年,Xue 等^[102]将互补压缩成像和一种阈值策略相结合,通过较少的采集次数获得较高质量的图像。

2017 年,Lyu 等^[103]基于计算鬼成像和深度学习提出了 GIDL (ghost imaging using deep

learning)方案。这是国内关联成像领域与前沿技术相结合的代表性工作之一。2018 年,Altmann 等^[104]在 *Science* 报道了他们的工作。将计算成像技术与人工智能相结合,这为成像技术提供了新的视角,在传感器和数据分析等领域具有重要的应用前景。同年,He 等^[105]结合人工智能技术提出了一种新型的深度学习关联成像。

除了算法优化之外,近年来,关联成像在光源、物体和实验方案的选择上也更加多样化,如单光子干涉关联成像^[106]、从相干光源到非相干光源的空间干涉实验^[107]、费米子关联成像^[108]、关联成像的 Talbot 效应^[109-111]、X 射线关联成像^[112-114]、太赫兹波段的关联成像技术^[115-116]等。在国外,2016 年,Ryczkowski 等^[117]报道了利用时间非相干光源和时间物体将鬼成像应用到时间域的 TGI (Temporal Ghost Imaging)实验;Khakimov 等^[118]利用高阶的 Kapitza-Dirac 散射产生关联的原子对代替光源实现关联成像。在国内,周成等^[119]研究了散射介质对多波长彩色物体关联成像的影响;梁振宇等^[120]基于热光高阶强度涨落关联成像理论研究了切向运动目标关联成像;谈志杰等^[121-122]研究了部分相干 X 光傅里叶变换鬼成像与非相干探测模式下啁啾调幅关联成像的影响因素;陈熠等^[123]研究了基于邻域相似度的压缩感知鬼成像。这些研究工作都加深了人们对关联成像的理解。

4 关联成像的应用和展望

近年来,关联成像技术已经具有一些应用价值:

1) 3D 遥感成像。2012 年,Zhao 等^[124]发表了关联成像雷达的研究成果,并在不同的天气条件下实现了物体的远距离遥感成像^[125]。2016 年,Gong 等^[126]通过将压缩传感算法和时间分辨测量技术相结合,实现了地物体的三维遥感关联成像。

2) 光学加密。2010 年,Clemente 等^[127]基于计算关联成像提出了光学加密方法。实验中,以加载到空间光调制器上的散斑图信息为密钥,以目标物体测量之后的强度信息为密文,接收方收到密文后,结合密钥就可以进行解密。2013 年,Kong 等^[128]完成了双光子关联成像的加密实验。随后,Chen 等^[129]实现了三维关联成像光学加密。

3) 生物医学应用。2009 年,Nasr 等^[130]利用纠缠光实现了生物样本的量子光学相干层析,实验结果如图 16 所示。此外,X 射线关联成像^[112-113]方案,特别是 2018 年超低辐射 X 射线关联成像^[114]的提

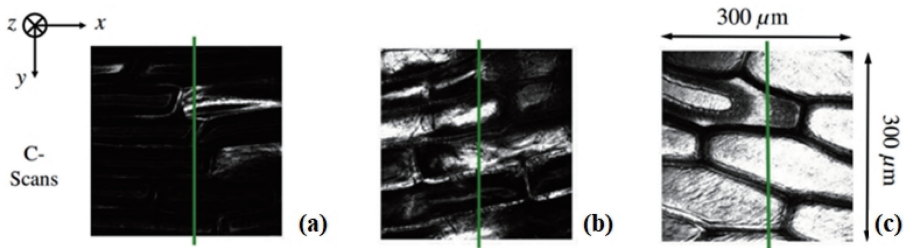


图 16 洋葱表皮样本的反射共焦显微镜扫描图。(a)未处理洋葱表皮;(b)在聚乙二醇金纳米粒子溶液中放置 48 h 的洋葱表皮;(c)在带有牛血清白蛋白的固体金纳米粒子溶液中放置 48 h 的洋葱表皮^[130]

Fig. 16 Reflection confocal microscopy (RCM) scans for different onion-skin samples. (a) Untreated onion-skin; (b) onion-skin incubated for 48 h in solution of pegylated gold nanoparticles; (c) onion-skin incubated for 48 h in solution of solid gold nanoparticles with bovine serum albumin (BSA) attached to them^[130]

出,结合关联成像在散射介质中成像的优异表现^[131],使得关联成像技术在生物医学领域具有很好的前景。

4) 人脸识别。近期, *Physical Review Letters* 报道了 Qiu 等^[132]在关联成像方面的最新进展——基于光场调控的量子图像识别。通过光场调控的手段,将量子关联成像与光学图像识别两种技术有效地融合在一起,采用空间结构光替代常用的基模高斯光抽运非线性晶体,从而有效地

调控下转换产生的纠缠双光子对的关联特性。通过在抽运光中加载目标人脸的傅里叶频谱信息(图 17),等效构建了一个量子版本的 Vander Lugt 滤波器。当闲置光子照射到相对应的人脸图像上时,与之关联的信号光子会在相机上形成一个明显的相关峰,如图 18 所示。该识别过程在单光子水平下完成,这意味着待探测的样本无法感知到这一过程,因而,该方案将会极大地推动隐蔽探测、无损生物样本识别等领域的发展。

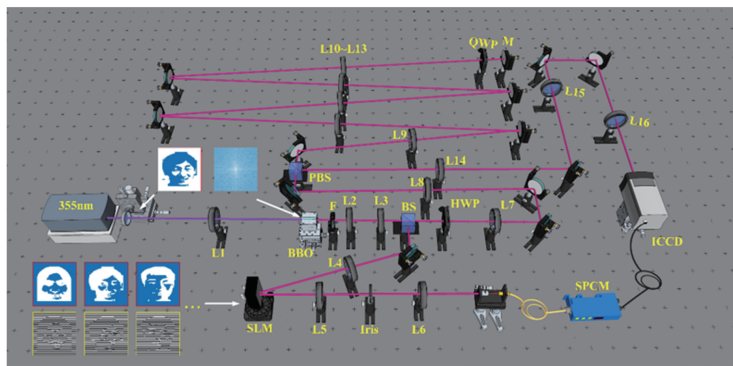


图 17 量子图像识别实验装置图^[132]

Fig. 17 Experimental setup of quantum pattern recognition^[132]

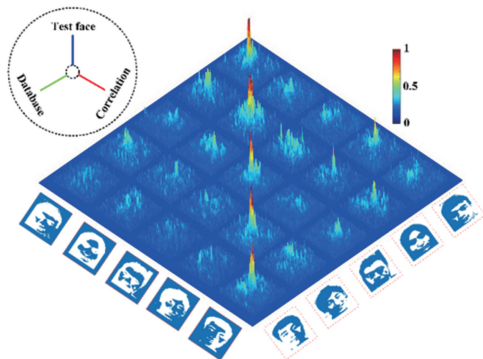


图 18 人脸识别实验结果^[132]

Fig. 18 Experimental results for human face recognition^[132]

关联成像已经慢慢走向应用,但是仍存在一些亟需解决的问题:

1) 成像质量问题。前文已经分析了影响重构图像质量的一些因素,也讨论了一些关联成像的处理方法,如算法优化等。在可预见的未来里,仍旧需要优化这些系统或者寻找新的成像方案和算法,进一步减小系统的噪声,提高关联成像的信噪比等。

2) 优化光源的使用方案,使得光源能够对系统进行快速响应,缩短样本的采集时间,如 Phillips 等^[133]报道的动态超采集的自适应单像素成像方案等。

3)走向实用化。要满足实际应用的需求,就必须要求关联成像系统更加快速。通过各种成像方案和算法的优化,使系统具有更快的采集速度、处理速度和成像速度。

5 结束语

关联成像是一种新颖的成像技术,由于其具有物像分离、抗干扰能力强等特点,在三维遥感、生物医疗、光学加密、国防军事等方面有着巨大的应用前景。回顾了关联成像发展历程中一系列里程碑式的实验方案,阐述了关联成像的物理本质和研究现状,展示了关联成像技术潜在的应用价值。目前,关联成像技术仍是国际物理学前沿研究热点之一。如何提高、改进成像方案,提升关联成像系统的性能等仍有待探索。在关联成像技术发展的关键时期里,必将充满挑战,但也必将充满机遇。

参 考 文 献

[1] Hanbury Brown R, Twiss R Q. A test of a new type of Stellar interferometer on sirius[J]. *Nature*, 1956, 178(4541): 1046-1048.

[2] Hanbury Brown R, Twiss R Q. Correlation between photons in two coherent beams of light[J]. *Journal of Astrophysics and Astronomy*, 1956, 177(7797): 27-29.

[3] Einstein A, Podolsky B, Rosen N. Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? [J]. *Physical Review*, 1935, 47(10): 777-780.

[4] 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.

[5] Ribeiro P H S, Pádua S, da Silva J C M, *et al.* Controlling the degree of visibility of Young's fringes with photon coincidence measurements [J]. *Physical Review A*, 1994, 49(5): 4176-4179.

[6] Pittman T B, Shih Y H, Strekalov D V, *et al.* Optical imaging by means of two-photon quantum entanglement [J]. *Physical Review A*, 1995, 52(5): R3429-R3432.

[7] Strekalov 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.

[8] Barbosa G A. Quantum images in double-slit experiments with spontaneous down-conversion light

[J]. *Physical Review A*, 1996, 54(5): 4473-4478.

[9] Fonseca E J S, Monken C H, Pádua S. Measurement of the de Broglie wavelength of a multiphoton wave packet [J]. *Physical Review Letters*, 1999, 82(14): 2868-2871.

[10] Fonseca E J S, Souto Ribeiro P H, Pádua S, *et al.* Quantum interference by a nonlocal double slit [J]. *Physical Review A*, 1999, 60(2): 1530-1533.

[11] Boto A N, Kok P, Abrams D S, *et al.* Quantum interferometric optical lithography: exploiting entanglement to beat the diffraction limit [J]. *Physical Review Letters*, 2000, 85(13): 2733-2741.

[12] D'Angelo M, Chekhova M V, Shih Y H. Two-photon diffraction and quantum lithography [J]. *Physical Review Letters*, 2001, 87(1): 013602.

[13] D'Angelo M, Valencia A, Rubin M H, *et al.* Resolution of quantum and classical ghost imaging [J]. *Physical Review A*, 2005, 72(1): 013810.

[14] Moreau P, Toninelli E, Morris P A, *et al.* Resolution limits of quantum ghost imaging [J]. *Optics Express*, 2018, 26(6): 7528-7536.

[15] Abouraddy A F, Stone P R, Sergienko A V, *et al.* Entangled-photon imaging of a pure phase object [J]. *Physical Review Letters*, 2004, 93(21): 213903.

[16] Kim Y H, Yu R, Shih Y H. Experimental realization of Popper's experiment: violation of uncertainty principle? [J]. *Foundations of Physics*, 1999, 29(12): 1849-1861.

[17] D'Angelo M, Kim Y H, Kulik S P, *et al.* Identifying entanglement using quantum ghost interference and imaging [J]. *Physical Review Letters*, 2004, 92(23): 233601.

[18] Jack B, Leach J, Romero J, *et al.* Holographic ghost imaging and the violation of a bell inequality [J]. *Physical Review Letters*, 2009, 103(8): 083602.

[19] Aspden R S, Tasca D S, Boyd R W, *et al.* EPR-based ghost imaging using a single-photon-sensitive camera [J]. *New Journal of Physics*, 2013, 15(7): 073032.

[20] Morris P A, Aspden R S, Bell J E C, *et al.* Imaging with a small number of photons [J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 5913.

[21] Aspden R S, Morris P A, He R Q, *et al.* Heralded phase-contrast imaging using an orbital angular momentum phase-filter [J]. *Journal of Optics*, 2016, 18(5): 055204.

[22] Rubin M H, Shih Y H. Resolution of ghost imaging for nondegenerate spontaneous parametric down-

- conversion[J]. *Physical Review A*, 2008, 78(3): 033836.
- [23] Chan K W C, O'Sullivan M N, Boyd R W. Two-color ghost imaging[J]. *Physical Review A*, 2009, 79(3): 033808.
- [24] Karmakar S, Shih Y H. Observation of two-color ghost imaging[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7702: 770204.
- [25] Aspden R S, Gemmell N R, Morris P A, *et al.* Photon-sparse microscopy: visible light imaging using infrared illumination[J]. *Optica*, 2015, 2(12): 1049-1052.
- [26] Li Y Q, Yang H, Liu J, *et al.* Colored object encoding scheme in ghost imaging system using orbital angular momentum [J]. *Chinese Optics Letters*, 2013, 11(2): 021104.
- [27] Uribe-Patarroyo N, Fraine A, Simon D S, *et al.* Object identification using correlated orbital angular momentum states [J]. *Physical Review Letters*, 2013, 110(4): 043601.
- [28] Chen L X, Leach J, Jack B, *et al.* High-dimensional quantum nature of ghost angular Young's diffraction [J]. *Physical Review A*, 2010, 82(3): 033822.
- [29] Chen L X, Lei J J, Romero J. Quantum digital spiral imaging[J]. *Light: Science & Applications*, 2014, 3(3): e153.
- [30] Wang K G, Cao D Z, Xiong J. Progress in correlated optics[J]. *Physics*, 2008, 37(4): 223-232.
汪凯戈, 曹德忠, 熊俊. 关联光学新进展[J]. *物理*, 2008, 37(4): 223-232.
- [31] Cai Y J. Correlated imaging and its applications[J]. *Journal of Sichuan Normal University (Natural Science)*, 2018, 41(6): 711-728.
蔡阳健. 关联成像及其应用研究进展[J]. *四川师范大学学报(自然科学版)*, 2018, 41(6): 711-728.
- [32] Li B, Fan H. Quantum correlation and its application [J]. *Scientia Sinica (Informationis)*, 2014, 44(3): 360-369.
李波, 范桁. 量子关联及其应用[J]. *中国科学: 信息科学*, 2014, 44(3): 360-369.
- [33] Abouraddy A F, Saleh B E A, Sergienko A V, *et al.* Role of entanglement in two-photon imaging [J]. *Physical Review Letters*, 2001, 87(12): 123602.
- [34] 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.
- [35] Bennink R S, Bentley S J, Boyd R W, *et al.* Quantum and classical coincidence imaging [J]. *Physical Review Letters*, 2004, 92(3): 033601.
- [36] Cheng J, Han S S. Incoherent coincidence imaging and its applicability in X-ray diffraction[J]. *Physical Review Letters*, 2004, 92(9): 093903.
- [37] 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.
- [38] Gatti A, Brambilla E, Bache M, *et al.* Correlated imaging, quantum and classical[J]. *Physical Review A*, 2004, 70(1): 013802.
- [39] Valencia A, Scarcelli G, D'Angelo M, *et al.* Two-photon imaging with thermal light [J]. *Physical Review Letters*, 2005, 94(6): 063601.
- [40] Xiong J, Cao D Z, Huang F, *et al.* Experimental observation of classical subwavelength interference with a pseudothermal light source [J]. *Physical Review Letters*, 2005, 94(17): 173601.
- [41] Zhang M H, Wei Q, Shen X, *et al.* Lensless Fourier-transform ghost imaging with classical incoherent light [J]. *Physical Review A*, 2007, 75(2): 021803.
- [42] Shen X, Bai Y F, Qin T, *et al.* Experimental investigation of quality of lensless ghost imaging with pseudo-thermal light [J]. *Chinese Physics Letters*, 2008, 25(11): 3968-3971.
- [43] Cao D Z, Xiong J, Wang K G. Geometrical optics in correlated imaging systems[J]. *Physical Review A*, 2005, 71(1): 013801.
- [44] Scarcelli G, Berardi V, Shih Y H. Phase-conjugate mirror via two-photon thermal light imaging [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 88(6): 061106.
- [45] Basano L, Ottonello P. Experiment in lensless ghost imaging with thermal light [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(9): 091109.
- [46] 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.
- [47] Zhai Y H, Chen X H, Zhang D, *et al.* Two-photon interference with true thermal light [J]. *Physical Review A*, 2005, 72(4): 043805.
- [48] Chen X H, Liu Q, Luo K H, *et al.* Lensless ghost imaging with true thermal light [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(5): 695-697.
- [49] Meyers R, Deacon K S, Shih Y H. Ghost-imaging experiment by measuring reflected photons [J]. *Physical Review A*, 2008, 77(4): 041801.
- [50] Karmakar S, Meyers R, Shih Y H. Ghost imaging

- experiment with sunlight compared to laboratory experiment with thermal light [J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8518: 851805.
- [51] Liu X F, Chen X H, Yao X R, *et al.* Lensless ghost imaging with sunlight[J]. *Optics Letters*, 2014, 39 (8): 2314-2317.
- [52] Bache M, Magatti D, Ferri F, *et al.* Coherent imaging of a pure phase object with classical incoherent light [J]. *Physical Review A*, 2006, 73 (5): 053802.
- [53] Gong W L, Han S S. Phase-retrieval ghost imaging of complex-valued objects [J]. *Physical Review A*, 2010, 82(2): 023828.
- [54] Zhang D J, Tang Q, Wu T F, *et al.* Lensless ghost imaging of a phase object with pseudo-thermal light [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104 (12): 121113.
- [55] Liu X F, Yao X R, Chen X H, *et al.* Thermal light optical coherence tomography for transmissive objects [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2012, 29(9): 1922-1926.
- [56] Magaña-Loaiza O S, Mirhosseini M, Cross R M, *et al.* Hanbury Brown and Twiss interferometry with twisted light [J]. *Science Advances*, 2016, 2 (4): e1501143.
- [57] Gao L, Hashemi Rafsanjani S M, Zhou Y Y, *et al.* Distributed angular double-slit interference with pseudo-thermal light [J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 110(7): 071107.
- [58] Yang Z, Magaña-Loaiza O S, Mirhosseini M, *et al.* Digital spiral object identification using random light [J]. *Light: Science & Applications*, 2017, 6 (7): e17013.
- [59] Xiao K, Gao L, Song H Q, *et al.* Non-local orientation filtered imaging with incoherent light source[J]. *Optics Express*, 2018, 26(22): 29401-29410.
- [60] Shapiro J H. Computational ghost imaging [J]. *Physical Review A*, 2008, 78(6): 061802.
- [61] Erkmen B I, Shapiro J H. Ghost imaging: from quantum to classical to computational[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2010, 2(4): 405-450.
- [62] Bromberg Y, Katz O, Silberberg Y. Ghost imaging with a single detector[J]. *Physical Review A*, 2009, 79(5): 053840.
- [63] Katz O, Bromberg Y, Silberberg Y. Compressive ghost imaging[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95 (13): 131110.
- [64] 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.
- [65] Sun B, Edgar M P, Bowman R, *et al.* 3D computational imaging with single-pixel detectors[J]. *Science*, 2013, 340(6134): 844-847.
- [66] Welsh S S, Edgar M P, Bowman R, *et al.* Fast full-color computational imaging with single-pixel detectors[J]. *Optics Express*, 2013, 21(20): 23068-23074.
- [67] 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.
- [68] Edgar M P, Sun M J, Gibson G M, *et al.* Real-time 3D video utilizing a compressed sensing time-of-flight single-pixel camera[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9922: 99221B.
- [69] Devaux F, Moreau P A, Denis S, *et al.* Computational temporal ghost imaging [J]. *Optica*, 2016, 3(7): 698-701.
- [70] Edgar M P, Gibson G M, Padgett M J. Principles and prospects for single-pixel imaging [J]. *Nature Photonics*, 2019, 13(1): 13-20.
- [71] Padgett M J, Boyd R W. An introduction to ghost imaging: quantum and classical [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical physical and Engineering Sciences*, 2017, 375(2099): 20160233.
- [72] Liu H L, Shen X, Zhu D M, *et al.* Fourier-transform ghost imaging with pure far-field correlated thermal light[J]. *Physical Review A*, 2007, 76(5): 053808.
- [73] Gong W L, Zhang P L, Shen X, *et al.* Ghost “pinhole” imaging in Fraunhofer region[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95(7): 071110.
- [74] Gong W L, Han S S. Lens ghost imaging with thermal light: from the far field to the near field[J]. *Physics Letters A*, 2010, 374(36): 3723-3725.
- [75] Shih Y H. Quantum imaging, quantum lithography and the uncertainty principle [J]. *The European Physical Journal D*, 2003, 22(3): 485-493.
- [76] Scarcelli G, Berardi V, Shih Y H. Can two-photon correlation of chaotic light be considered as correlation of intensity fluctuations? [J]. *Physical Review Letters*, 2006, 96(6): 063602.
- [77] Shih Y H. The physics of ghost imaging[M]//Cohen

- L, Poor H, Scully M. Classical, semi-classical and quantum noise. Boston, MA: Springer, 2011: 169-222.
- [78] Shapiro J H, Boyd R W. The physics of ghost imaging[J]. *Quantum Information Processing*, 2012, 11(4): 949-993.
- [79] Shih Y H. The physics of ghost imaging: nonlocal interference or local intensity fluctuation correlation? [J]. *Quantum Information Processing*, 2012, 11(4): 995-1001.
- [80] Shapiro J H, Boyd R W. Response to “The physics of ghost imaging: nonlocal interference or local intensity fluctuation correlation?” [J]. *Quantum Information Processing*, 2012, 11(4): 1003-1011.
- [81] Chen L X. Resolution to the quantum-classical dilemma in thermal ghost imaging[J/OL]. (2016-08-09) [2018-12-15]. <https://arxiv.org/abs/1608.02879>.
- [82] Cheng J. Ghost imaging through turbulent atmosphere[J]. *Optics Express*, 2009, 17(10): 7916-7921.
- [83] Meyers R E, Deacon K S, Shih Y H. Turbulence-free ghost imaging [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 98(11): 111115.
- [84] Cai Y J, Zhu S Y. Ghost interference with partially coherent radiation [J]. *Optics Letters*, 2004, 29(23): 2716-2718.
- [85] Cai Y J, Zhu S Y. Ghost imaging with incoherent and partially coherent light radiation[J]. *Physical Review E*, 2005, 71(5): 056607.
- [86] Cai Y J, Wang F. Lensless imaging with partially coherent light[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(3): 205-207.
- [87] Ou L H, Kuang L M. Ghost imaging with third-order correlated thermal light[J]. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 2007, 40(10): 1833-1844.
- [88] Bai Y F, Han S S. Ghost imaging with thermal light by third-order correlation [J]. *Physical Review A*, 2007, 76(4): 043828.
- [89] Cao D Z, Xiong J, Zhang S H, *et al.* Enhancing visibility and resolution in Nth-order intensity correlation of thermal light [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(20): 201102.
- [90] Chen X H, Agafonov I N, Luo K H, *et al.* High-visibility, high-order lensless ghost imaging with thermal light [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(8): 1166-1168.
- [91] Moreau P A, Toninelli E, Gregory T, *et al.* Ghost imaging using optical correlations [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2018, 12(1): 1700143.
- [92] Zhang D J, Li H G, Zhao Q L, *et al.* Wavelength-multiplexing ghost imaging [J]. *Physical Review A*, 2015, 92(1): 013823.
- [93] Zerom P, Chan K W C, Howell J C, *et al.* Entangled-photon compressive ghost imaging [J]. *Physical Review A*, 2011, 84(6): 061804.
- [94] Ferri F, Magatti D, Lugiatto L A, *et al.* Differential ghost imaging [J]. *Physical Review Letters*, 2010, 104(25): 253603.
- [95] Sun B Q, Welsh S S, Edgar M P, *et al.* Normalized ghost imaging [J]. *Optics Express*, 2012, 20(15): 16892-16901.
- [96] Luo K H, Huang B Q, Zheng W M, *et al.* Nonlocal imaging by conditional averaging of random reference measurements [J]. *Chinese Physics Letters*, 2012, 29(7): 074216.
- [97] Li M F, Zhang Y R, Luo K H, *et al.* Time-correspondence differential ghost imaging [J]. *Physical Review A*, 2013, 87(3): 033813.
- [98] Li M F, Zhang Y R, Liu X F, *et al.* A double-threshold technique for fast time-correspondence imaging [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103(21): 211119.
- [99] Zhao S M, Zhuang P. Correspondence normalized ghost imaging on compressive sensing [J]. *Chinese Physics B*, 2014, 23(5): 054203.
- [100] Sun M J, Li M F, Wu L A. Nonlocal imaging of a reflective object using positive and negative correlations [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(25): 7494-7499.
- [101] Wang L, Zhao S M. Fast reconstructed and high-quality ghost imaging with fast Walsh-Hadamard transform [J]. *Photonics Research*, 2016, 4(6): 240-244.
- [102] Xue C B, Yao X R, Liu X F, *et al.* Improving the signal-to-noise ratio of complementary compressive imaging with a threshold [J]. *Optics Communications*, 2017, 393: 118-122.
- [103] Lyu M, Wang W, Wang H, *et al.* Deep-learning-based ghost imaging [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 17865.
- [104] Altmann Y, McLaughlin S, Padgett M J, *et al.* Quantum-inspired computational imaging [J]. *Science*, 2018, 361(6403): eaat2298.
- [105] He Y C, Wang G, Dong G X, *et al.* Ghost imaging

- based on deep learning [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 6469.
- [106] Gao L, Zhang S H, Xiong J, *et al.* Correlated imaging with one-photon interference [J]. *Physical Review A*, 2009, 80(2): 021806.
- [107] Zhang S H, Gao L, Xiong J, *et al.* Spatial interference: from coherent to incoherent [J]. *Physical Review Letters*, 2009, 102(7): 073904.
- [108] Gan S, Cao D Z, Wang K G. Dark quantum imaging with fermions [J]. *Physical Review A*, 2009, 80(4): 043809.
- [109] Luo K H, Chen X H, Liu Q, *et al.* Nonlocal Talbot self-imaging with incoherent light [J]. *Physical Review A*, 2010, 82(3): 033803.
- [110] Song X B, Xiong J, Zhang X D, *et al.* Second-order Talbot self-imaging with pseudothermal light [J]. *Physical Review A*, 2010, 82(3): 033823.
- [111] Song X B, Wang H B, Xiong J, *et al.* Experimental observation of quantum Talbot effects [J]. *Physical Review Letters*, 2011, 107(3): 033902.
- [112] Yu H, Lu R H, Han S S, *et al.* Fourier-transform ghost imaging with hard X rays [J]. *Physical Review Letters*, 2016, 117(11): 113901.
- [113] Pelliccia D, Rack A, Scheel M, *et al.* Experimental X-ray ghost imaging [J]. *Physical Review Letters*, 2016, 117(11): 113902.
- [114] Zhang A X, He Y H, Wu L A, *et al.* Tabletop X-ray ghost imaging with ultra-low radiation [J]. *Optica*, 2018, 5(4): 374-377.
- [115] Chan W L, Charan K, Takhar D, *et al.* A single-pixel terahertz imaging system based on compressed sensing [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 93(12): 121105.
- [116] Yan Y Q, Zhao C Q, Xu W D, *et al.* Research on the terahertz active ghost imaging technology [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(8): 0814001. 闫昱琪, 赵成强, 徐文东, 等. 太赫兹主动关联成像技术研究 [J]. *中国激光*, 2018, 45(8): 0814001.
- [117] Ryczkowski P, Barbier M, Friberg A T, *et al.* Ghost imaging in the time domain [J]. *Nature Photonics*, 2016, 10(3): 167-170.
- [118] Khakimov R I, Henson B M, Shin D K, *et al.* Ghost imaging with atoms [J]. *Nature*, 2016, 540(7631): 100-103.
- [119] 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.
- [120] Liang Z Y, Fan X, Cheng Z D, *et al.* High-order thermo-optic ghost imaging for a tangential moving target [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(8): 081102. 梁振宇, 樊祥, 程正东, 等. 切向运动目标的热光高阶鬼成像研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(8): 081102.
- [121] Tan Z J, Yu H, Lu R H, *et al.* Study on Fourier-transform ghost imaging with partially coherent X-ray [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(4): 0411001. 谈志杰, 喻虹, 陆荣华, 等. 部分相干 X 光傅里叶变换鬼成像研究 [J]. *光学学报*, 2017, 37(4): 0411001.
- [122] Pan L, Deng C J, Gong W L, *et al.* Influence of chirped-amplitude correlated imaging under incoherent detection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(10): 1011001. 潘龙, 邓陈进, 龚文林, 等. 非相干探测模式下啁啾调幅关联成像影响因素研究 [J]. *光学学报*, 2018, 38(10): 1011001.
- [123] Chen Y, Fan X, Cheng Y B, *et al.* Compressive sensing ghost imaging based on neighbor similarity [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(7): 0711001. 陈熠, 樊祥, 程玉宝, 等. 基于邻域相似度的压缩感知鬼成像 [J]. *光学学报*, 2018, 38(7): 0711001.
- [124] Zhao C Q, Gong W L, Chen M L, *et al.* Ghost imaging lidar via sparsity constraints [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(14): 141123.
- [125] 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.
- [126] Gong W L, Zhao C Q, Yu H, *et al.* Three-dimensional ghost imaging lidar via sparsity constraint [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 26133.
- [127] Clemente P, Durán V, Torres-Company V, *et al.* Optical encryption based on computational ghost imaging [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(14): 2391-2393.
- [128] Kong L J, Li Y N, Qian S X, *et al.* Encryption of ghost imaging [J]. *Physical Review A*, 2013, 88(1): 013852.
- [129] Chen W, Chen X D. Ghost imaging for three-dimensional optical security [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103(22): 221106.

-
- [130] Nasr M B, Goode D P, Nguyen N, *et al.* Quantum optical coherence tomography of a biological sample [J]. *Optics Communications*, 2009, 282(6): 1154-1159.
- [131] Gong W L, Han S S. Correlated imaging in scattering media [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(3): 394-396.
- [132] Qiu X D, Zhang D K, Zhang W H, *et al.* Structured-pump-enabled quantum pattern recognition [J]. *Physical Review Letters*, 2019, 122(12): 123901.
- [133] Phillips D B, Sun M J, Taylor J M, *et al.* Adaptive foveated single-pixel imaging with dynamic supersampling [J]. *Science Advances*, 2017, 3(4): e1601782.