

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2023.03.06

基于量子关联的显微成像研究进展

朱孝辉, 梁小茜, 谭威, 黄贤伟, 白艳锋, 傅喜泉*

(湖南大学 信息科学与工程学院, 湖南长沙 410082)

摘要: 简要回顾了量子关联成像的基本原理和发展历程, 从量子光源和经典光源的角度详细介绍了量子关联成像在显微成像中的研究进展。做出了基于经典源的量子关联成像因易于实施、成本较低, 在显微成像中更具应用前景的判断。

关键词: 成像系统; 显微成像; 量子关联成像; 量子光学

中图分类号: TB939; O431 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-5795(2023)03-0060-15

Advances in microscopic imaging based on quantum correlation

ZHU Xiaohui, LIANG Xiaoqian, TAN Wei, HUANG Xianwei, BAI Yanfeng, FU Xiquan*

(College of Computer Science and Electronic Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: The basic principles and development history of quantum correlated imaging are briefly reviewed, and the research progress of quantum correlated imaging in microscopic imaging is introduced in detail from the perspective of quantum light sources and classical light sources. Quantum correlated imaging based on classical light sources is easy to implement and low in cost, making it more promising in microscopic imaging.

Key words: imaging system; microscopic imaging; quantum correlated imaging; quantum optics

0 引言

显微成像是探索生物组织结构和功能的主要方法, 光学显微镜是显微成像中应用广泛和有效的工具。由于光学衍射的作用, 使得传统光学显微镜的分辨率受到限制, 难以满足现代生命科学和生物医学等领域的需求。为此, 研究人员发展了多种超分辨显微成像技术, 如结构光照明显微镜^[1]、受激辐射损耗显微镜^[2]、光激活定位显微镜^[3]和随机光学重建显微镜^[4]等。但这些技术的成像过程需要荧光标记, 且对成像分辨率的提升也多以更长的测量时间和更高光能量需求为代价,

反过来增加了对生物组织的光漂白和光毒性^[5-7]。此外, 现代研究级的显微镜十分复杂且价格昂贵, 难以被广泛应用^[8-10]。因此, 迫切需要开发一种无标记、低损伤和低成本的高分辨显微成像技术。

量子关联成像也称为关联成像或鬼成像, 是一种利用光场间高阶关联特性进行成像的技术。其基本原理是经过调制后的光场通过分束器分成两束: 其中一束光为物光, 可与物体相互作用后用无空间分辨能力的光电探测器(桶探测器)测量其总光强; 另一束光为参考光, 不经过物体直接由具有空间分辨能力的探测器来探测其光强分布。随后, 经过关联运算重建出物体的图像。

收稿日期: 2022-11-25; 修回日期: 2022-01-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(61871431, 61971184, 62001162)

引用格式: 朱孝辉, 梁小茜, 谭威, 等. 基于量子关联的显微成像研究进展[J]. 计测技术, 2023, 43(3): 60-74.

Citation: ZHU X H, LIANG X Q, TAN W, et al. Advances in microscopic imaging based on quantum correlation [J]. Metrology & Measurement Technology, 2023, 43(3): 60-74.



1995年,美国马里兰大学的史砚华课题组^[11]利用纠缠量子光源完成了第一个量子关联成像实验,经研究发现,赝热光和真热光也可以实现量子关联成像^[12-16]。虽然热光源不是量子光源,但是基于热光源的关联成像与量子纠缠光成像的原理都是基于光场的高阶关联,这完全有别于传统成像,因此热光源关联成像也属于量子成像范畴^[17-18]。并且由于赝热光易于产生和控制,现在的量子关联成像多使用其作为光源。2008年,美国麻省理工学院的Shapiro教授^[19]提出:量子关联成像中,光源可采用预制的方式,仅使用一路物光进行成像,开创了量子关联成像的计算成像方式。计算关联成像一经提出,就迅速和压缩感知算法结合,使得关联成像以极低的采样率获得高质量的重建图像^[20-23]。除了直接对实空间物体成像,基于量子关联的机制,还可以利用点探测器接收物光的单点信息,重建出物体的远场衍射像,即鬼衍射^[12, 24]。

单像素成像是一种利用单个光电探测器进行成像的计算成像技术^[25-29]。从数学和光学角度来看,计算关联成像和单像素成像没有本质区别^[30]。二者通常表现出来的不同特征在于前者是“结构化照明”而后者是“结构化探测”^[30]。“结构化照明”是指计算关联成像中照射到物体上的光场是具有结构性、预制好的光场,探测端仅使用桶探测器收光。“结构化探测”是指单像素成像中照明物体的光场没有经过预制,而是在经过物体后,光场被数字微透镜阵列器件(DMD)或空间光调制器(SLM)所调制。因此,本文中不区分两者,可暂将单像素成像归入量子关联成像范畴。

量子关联成像最突出的优势之一是探测过程和成像过程可分离^[31]。重建图像的分辨能力由参考光路上的多像素探测器决定,而与成像物体相互作用的物光路只提供涨落信息。这使得我们可以单独控制物光的强弱以减小对生物组织的光漂白和光损伤。量子关联成像的分辨率由物面上的散斑尺寸决定^[32-34]。用桶探测器测量含有物体信息的信号,不仅方式简单而且灵敏度较高。同时,量子关联成像具有一定的抗干扰能力^[35-38]。这些特性使得量子关联成像十分适合应用于显微成像领域。

本文首先介绍量子关联成像的基本原理,然后从量子光源和经典光源的角度出发,总结量子关联成像在显微成像中的研究成果,为相关领域研究人员提供一定的参考。

1 量子关联成像的基本原理

从数学角度看,量子关联成像是以桶探测器值为权重的参考光场的线性组合。假设物体和CCD探测器都有 N 个像素点,物体用列向量表示为

$$\mathbf{O} = [O_1, O_2, \dots, O_N]^T \quad (1)$$

每次测量后,CCD得到的矩阵可用一个行向量表示。例如,对第 m 次测量,有

$$\mathbf{I}_m = [I_{m,1}, I_{m,2}, \dots, I_{m,N}] \quad (2)$$

第 m 次测量得到的桶探测器值为

$$B_m = \mathbf{I}_m \mathbf{O} = \sum_{k=1}^N I_{m,k} O_k \quad (3)$$

若总的测量次数为 M ,则有

$$\begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{1,1} & I_{1,2} & \cdots & I_{1,N} \\ I_{2,1} & I_{2,2} & \cdots & I_{2,N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ I_{M,1} & I_{M,2} & \cdots & I_{M,N} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} O_1 \\ O_2 \\ \vdots \\ O_N \end{bmatrix} \quad (4)$$

令 $\mathbf{B} = [B_1, B_2, \dots, B_M]^T$,测量矩阵 \mathbf{I} 为

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_1 \\ \mathbf{I}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{I}_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{1,1} & I_{1,2} & \cdots & I_{1,N} \\ I_{2,1} & I_{2,2} & \cdots & I_{2,N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ I_{M,1} & I_{M,2} & \cdots & I_{M,N} \end{bmatrix} \quad (5)$$

对于传统关联成像^[12, 39],有

$$\mathbf{C}\mathbf{I} = \frac{1}{M} \mathbf{I}^T \mathbf{B} = \frac{1}{M} \mathbf{I}^T \mathbf{I} \mathbf{O} \quad (6)$$

由式(6)可以看出,若测量矩阵 \mathbf{I} 为正交矩阵,则理论上关联成像能够准确恢复物体信息,这也是在计算关联成像中预制散斑多为正交散斑的原因。但是,大多数测量矩阵是不正交的,例如激光照射毛玻璃产生的赝热光场是光强服从负指数分布的随机散斑,散斑场之间通常不满足正交性。因此,常见的关联成像算法是减去测量矩阵和桶探测器值的均值后再进行关联运算,这会消除一部分背景噪声的影响。此外,研究人员还提出了众多算法以进一步提高关联成像的质量,例如:高阶关联^[40-43]、差分鬼成像^[44-46]、伪逆鬼成像^[47-49]和二阶相干度归一关联算法^[50]等。

2 量子关联成像在显微成像中的研究进展

近些年来,逐渐展开了量子关联成像在显微成像中的研究工作,这些工作从光源的角度大体上可分为基于量子光源的量子关联成像及基于经典光源的量子关联成像两类。下文将从这两方面介绍相关研究进展。

2.1 基于量子光源的量子关联显微成像

基于量子光源的成像研究有很多^[51-55],但基于量子光源的量子关联成像应用于显微成像的并不多。2015年,英国格拉斯哥大学 Morris 等人^[56]利用纠缠光源完成了少光子量子关联成像实验,实验装置如图1所示。

图1中355 nm的泵浦光入射到BBO晶体上,由参量下转换过程产生波长为710 nm的纠缠光子对。分束后,一路光(物光)经过物体后到达单光子探

测器,另一路光(参考光)不经过物体最后被ICCD相机探测。当物光路上的单光子探测器探测到光子时,便发出触发信号给参考光路上的ICCD相机使其拍摄图像。由于这个触发过程是电信号传输,会有约70 ns的时间延迟。为了确保两路探测到的是同一对关联光子,需要在参考光路引入约22 m的空间延迟光路,即图中绿色部分。利用符合测量技术,可以使得两路光仅在探测到同一对纠缠光子时才工作,有效滤除了时域上不同时刻的背景噪声。研究人员随后给出了优化重建算法,实现了在总入射光子数小于7 000且平均每个像素点光子数小于0.2时,对分辨率板上相应物体的成像。最后,给出了在低光子数和高光子数时该方法对黄蜂翅膀的成像结果,如图2所示,其中, λ 为正则化参数。得到图2(b)中的图像仅探测了40 419个光子,平均每个像素点只有0.45个光子。

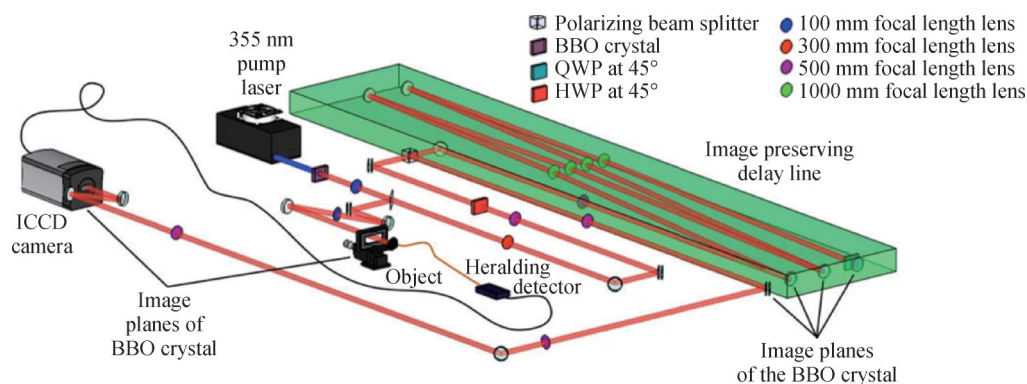


图1 少光子量子关联成像实验装置^[56]

Fig.1 Experimental setup for few-photon quantum correlated imaging^[56]

同年,该组使用类似的方法,利用参量下转换过程产生460 nm和1550 nm的光子对,实现了一种稀疏光子显微镜系统^[57],如图3(a)所示,该显微镜用1550 nm的红外光^[58]作为物光照明物体,而460 nm的可见光则作为参考光被ICCD相机探测,通过红外照明但可见光探测的方式实现了对物体的成像。图3(b)给出了稀疏光子显微镜在总曝光30 min时的成像结果,成像系统的分辨率为15 μm 。这种可利用不同波长转换实现成像的方式,对波长敏感的样品成像时具有独特优势。

2019年,意大利研究小组的 Losero 等人^[59]指出,在弱光条件下,纠缠光源的成像信噪比要优

于经典热光源,而在光强较强的情况下,纠缠光源与经典热光源的成像信噪比趋于一致。对于纠缠光源,在弱光条件且探测过程存在损耗时,差分鬼成像算法^[44]的成像信噪比会低于传统涨落鬼成像算法;这与光强较强时,差分鬼成像算法的成像信噪比远高于传统涨落鬼成像算法的结论是不同的。因此科研人员提出了一种优化差分鬼成像方法并将其应用于显微成像。

差分鬼成像算法的核心思想是利用CCD探测器的积分值修正桶探测器数据,从而提高成像的信噪比。优化差分鬼成像方法是以成像信噪比为目标,进一步采取更优的策略修正桶探测数据。基于该方法, Losero 等人搭建了一套量子差分显

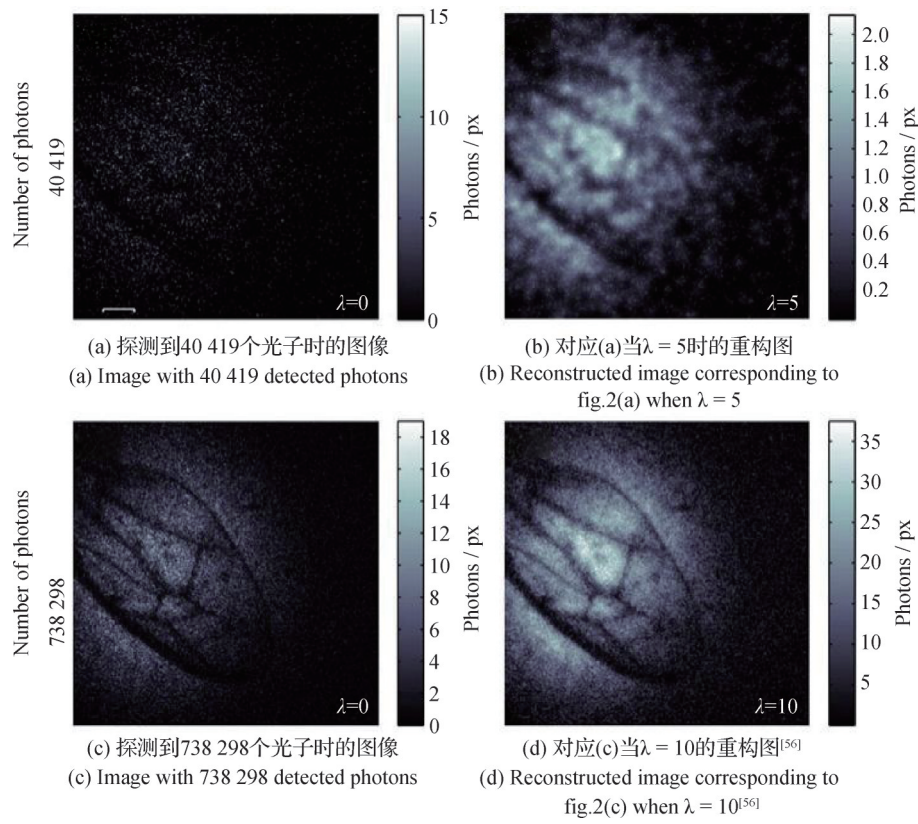
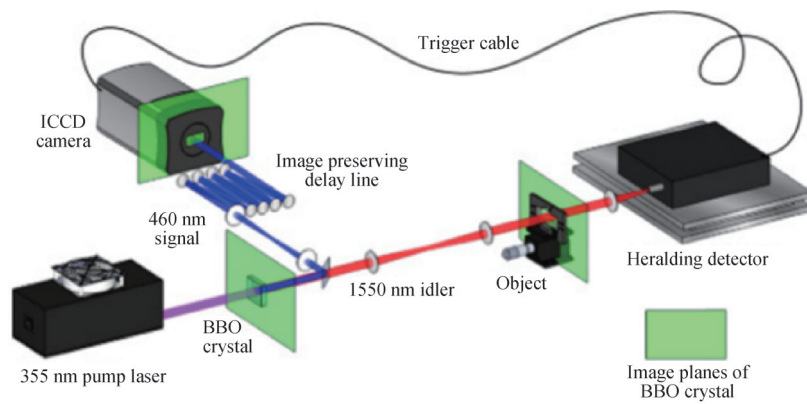


图2 黄蜂翅膀的正则化图像
Fig.2 Regularized images of a wasp wing



(a) 稀疏光子显微镜实验装置图
(a) Experimental setup for sparse photon microscopy

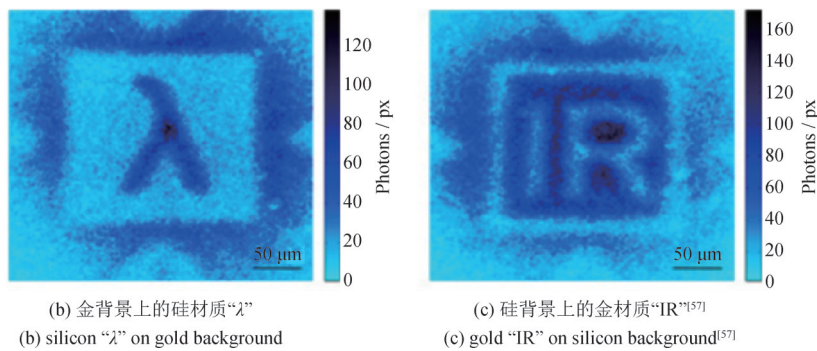


图3 稀疏光子显微镜实验装置及成像结果
Fig.3 Experimental setup and imaging results of sparse photon microscopy

微镜系统，如图4所示。405 nm的泵浦光照射BBO晶体，产生了波长为810 nm的纠缠光子对，该光子对一路经过物体，一路不经过物体，两路光通过同一个透镜放大到CCD探测器上。图5给出了该装置对黄蜂翅膀成像的结果，可以看出，Losero等人提出的优化差分鬼成像方法能够看到更多的细节，边缘轮廓更加清晰。

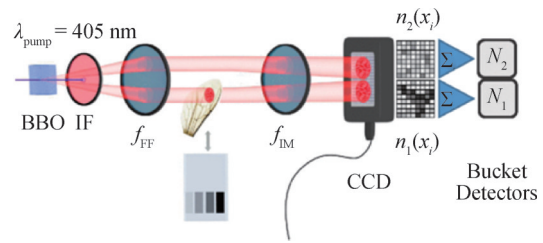
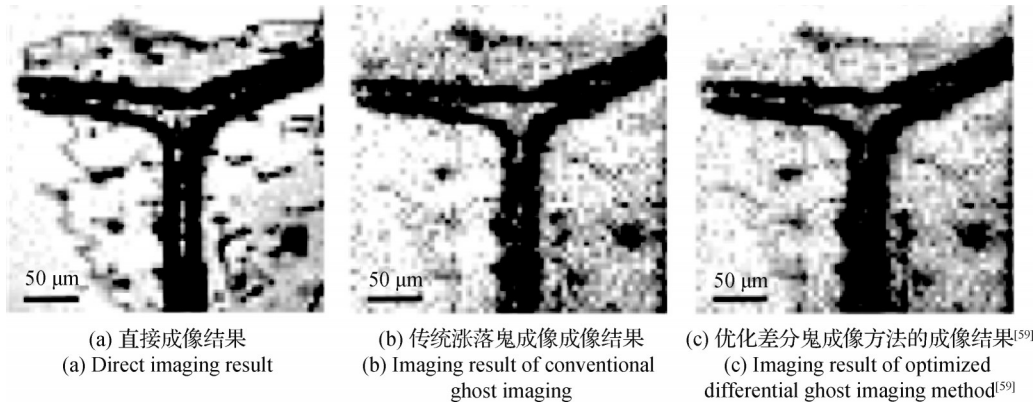


图4 量子差分鬼显微镜^[59]

Fig.4 Quantum differential ghost microscopy^[59]



(a) 直接成像结果
(a) Direct imaging result
(b) 传统涨落鬼成像成像结果
(b) Imaging result of conventional ghost imaging
(c) 优化差分鬼成像方法的成像结果^[59]
(c) Imaging result of optimized differential ghost imaging method^[59]

图5 黄蜂翅膀的成像结果

Fig.5 Imaging results of a wasp wing

2.2 基于经典光源的量子关联显微成像

经典光源相对于量子光源获取较容易，因此基于经典光源的量子关联成像应用于显微成像的研究相对较多^[60-77]。2009年，Zhang P L (张鹏黎)等人^[60]发现增大双臂式量子关联成像系统的参考臂中透镜的数值孔径，能够提升系统的分辨力，这一发现对量子关联成像应用于内窥镜设计有一定的指导作用。2012年，Studer等人^[61]将压缩感知和荧光显微镜结合，应用于生物成像和高光谱成像。图6为压缩荧光显微镜的实验装置，该装置基于一个标准的倒置荧光显微镜，通过DMD调制产生照明模式并用一个单像素探测器(PMT)接收

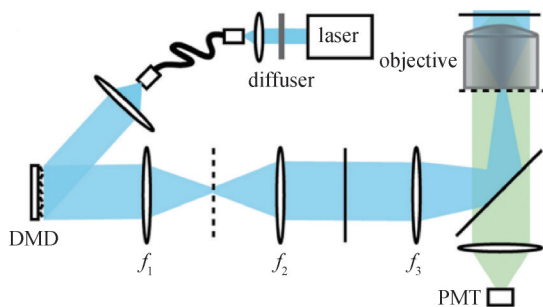


图6 压缩荧光显微镜^[61]

Fig.6 Compressive fluorescence microscopy^[61]

激发的荧光信号。2012年，西班牙海梅一世大学的研究小组^[62]结合相移数字全息和鬼衍射技术，提出了一种单像素鬼全息技术，实验装置如图7所示，装置的主体为一个马赫-曾德尔(Mach-Zehnder, MZ)干涉仪^[62]，空间光调制器置于干涉仪的一臂上，用以加载随机相位同时附加0或 π 的相位，物体则在空间光调制器的后面，干涉仪另一臂作为参考光场。两路光经过干涉叠加后用点探测器探测叠加光场中心的光强值，当把物体移出干涉装置时，可利用相移数字全息技术计算出参考光场，随后根据关联计算可得到物体的傅里叶全息图，计算出物体的振幅和相位信息。

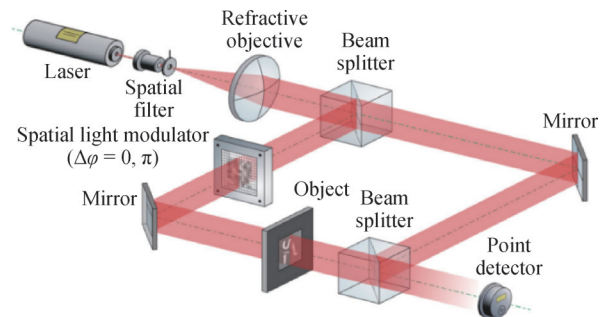


图7 数字鬼全息装置^[62]

Fig.7 Digital ghost holography^[62]

2013年, 西班牙该研究小组又将相移数字全息、单像素成像和压缩感知技术结合, 提出了一种基于两路干涉的压缩单像素数字全息技术, 其原理如图8所示。^[78]装置的主体依然是一个MZ干涉仪, 物体置于干涉仪的一臂上, 液晶空间光调制器产生Hadamard模式用以编码采样物体的远场衍射光场。在干涉仪的另一臂上, 放置一个相移器。对于空间光调制器每一次调制, 相移器对所在光路施加3个不同相位延迟: $0, \pi/2, \pi$, 单像素探测器收集每次相移后两路叠加光场的干涉信号。最后, 结合压缩感知算法, 可实现在较低采样率下对复值物体的振幅和相位的重构^[78-79]。

2021年, 中山大学的李朝晖课题组利用相似的原理, 设计了一种高通量单像素全息系统, 将

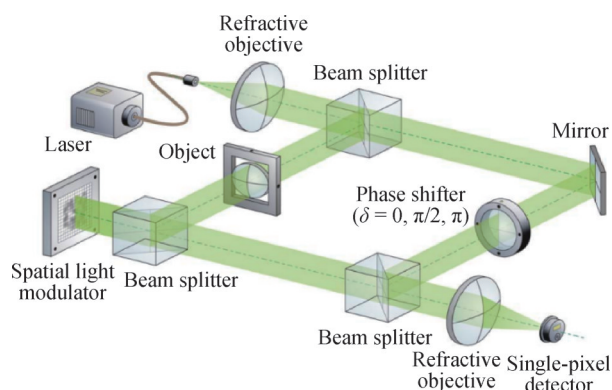


图8 压缩相移单像素数字全息^[78]

Fig.8 Compressive phase-shifting single-pixel digital holography^[78]

物体看成是一系列 Hadamard 模式的叠加, 每个模式的叠加系数用一个复数表示。高通量单像素全息系统的原理图如图9所示, 两个声光调制器置于MZ干涉仪的两臂, 并使两臂存在一个频差, 从而干涉仪出口会得到一个拍频信号, 通过分析拍频信号便可得到每个 Hadamard 模式的叠加系数, 进而恢复出物体信息^[80]。该方法利用两个声光调制器实现快速相移, 替代了相移数字全息中的主动相移方式。利用这种方法, 该课题组成功实现了对染色的小鼠尾巴切片和未染色小鼠大脑组织切片的成像。此外还综合考虑了图像的分辨率和采样时间等因素, 提出使用空间带宽时间积的概念来定量比较多种单像素成像和单像素全息方案的性能^[29, 80], 该方法的空间带宽时间积达到了41 667像素/秒。

2015年, 暨南大学 Zhang Z B (张子邦) 等人^[81]提出了通过单像素成像获取图像的傅里叶谱并进行成像的方法, 如图10所示, 投影仪向物体投射不同空间频率的条纹图案, 且每个空间频率投影4个不同初相位条纹。被物体反射的光一部分经过毛玻璃被散射, 另一部分被白色A4纸反射(图中红色箭头)。探测器1置于毛玻璃后, 用以收集部分散射光; 探测器2置于A4纸前, 用以收集A4纸的部分反射光和毛玻璃的部分散射光。然后, 通过四步相移法计算物体的傅里叶谱再进而得到

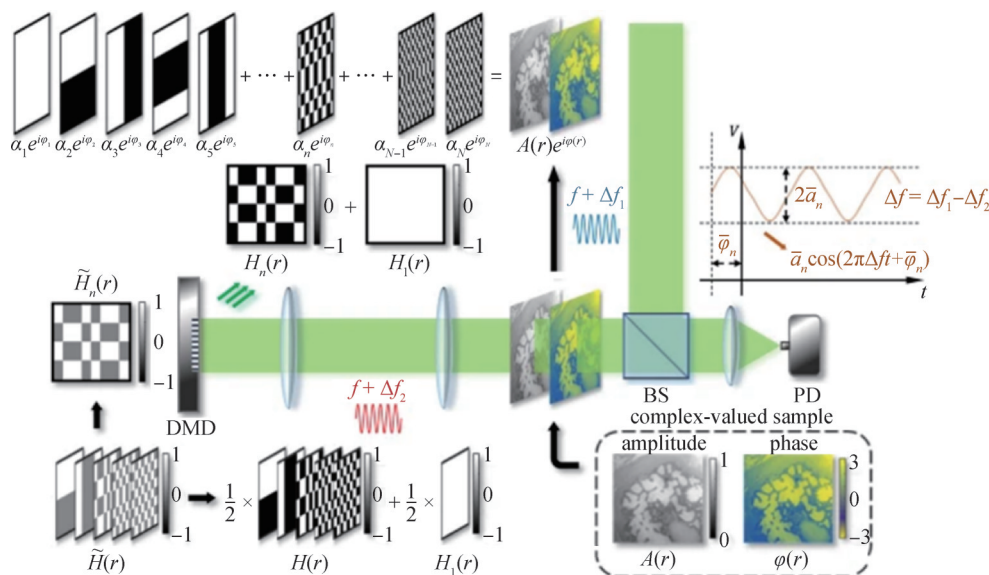


图9 高通量单像素压缩全息示意图^[80]

Fig.9 Schematic diagram of high-throughput single-pixel compressive holography^[80]

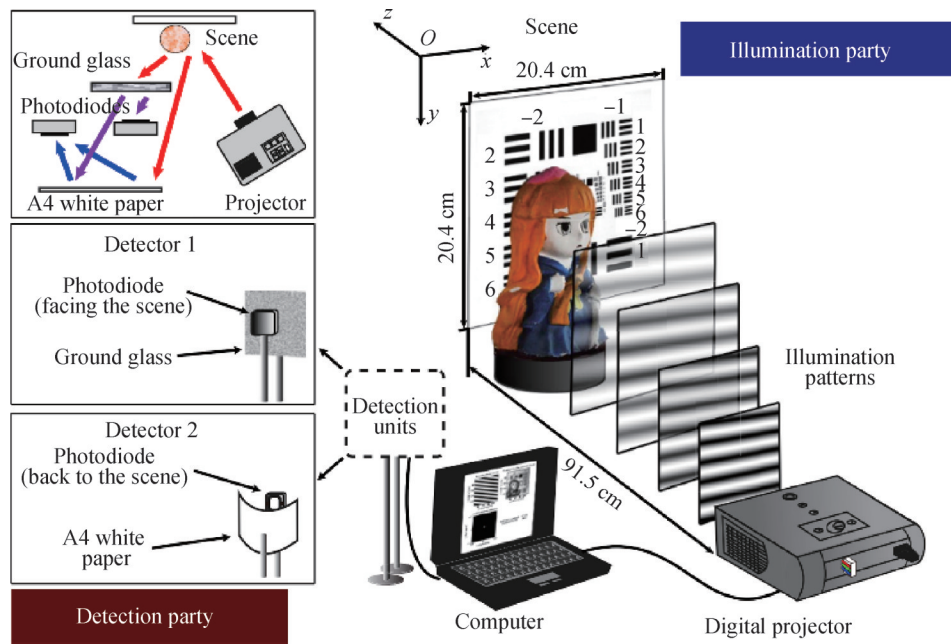


图 10 傅里叶单像素成像^[81]
Fig.10 Fourier single-pixel imaging^[81]

物体的图像。实验结果表明，通过探测器1和探测器2记录的数据都能恢复物体图像。2017年，该课题组比较了Hadamard基采样和傅里叶基采样的优劣，并将两种方法应用到显微成像中，实验装置如图11所示^[64]。计算机控制一台基于DMD的投影仪产生采样图案，调制后的光场通过套筒透镜和显微物镜照明物体，单像素探测器收集物体的透射光信号并传输到计算机进行存储和物体重建。图12给出了利用傅里叶基底时对兔子味蕾样品和前列腺癌细胞样品的成像结果^[82]，可以看出，单像素成像所得的结果对比度更高。

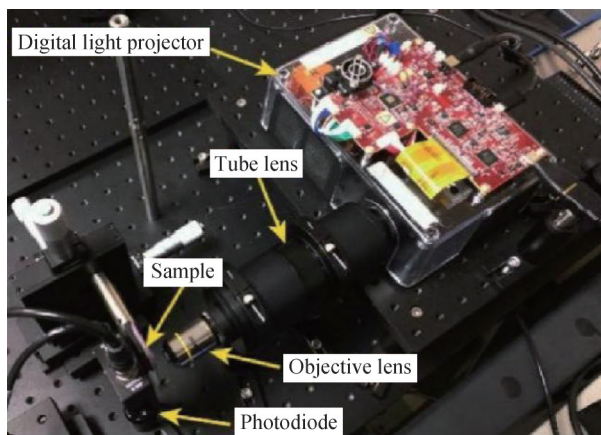


图 11 单像素显微镜^[64]
Fig.11 Single-pixel microscopy^[64]

2017年，作者所在课题组研究了在弱光条件下探测噪声对量子关联成像的影响，实验装置如图13所示^[83]。激光经过旋转毛玻璃后被分束器分成物光和参考光，物光信号经过衰减平台和物体后被光子计数模块（PCM）探测，参考光则直接被CCD相机接收。研究表明：当信号强度小于噪声强度时，噪声对成像质量有显著的负面影响。因此，文献[83]中还提出了一种排序技术来提高量子关联成像的质量，对弱光下量子显微成像的研究有一定的指导作用。

2018年，日本研究人员^[65]提出了一种基于鬼成像原理的细胞识别和分选系统，称为鬼细胞分选仪（Ghost Cytometry），如图14所示。该装置采用三维流体力学聚焦技术聚焦细胞流（左上），然后细胞经过设定好的静态编码矩形图案区域时，PMT记录下编码后细胞发出的荧光光波信号，得到一个一维时序信号（右上）。随后，加载了支持向量机（SVM）分类器的FPGA接收信号并进行分类（右中下）。根据分类结果FPGA控制压电致动器（PZT）将细胞分到不同收集口（左下）。实验中该装置能以每秒3 000个细胞的吞吐率进行细胞的鉴别和分离。该方法虽然不是对细胞成像，但是结合机器学习实现了高速率的细胞分类筛选，证实了关联成像在显微成像领域的应用潜力。

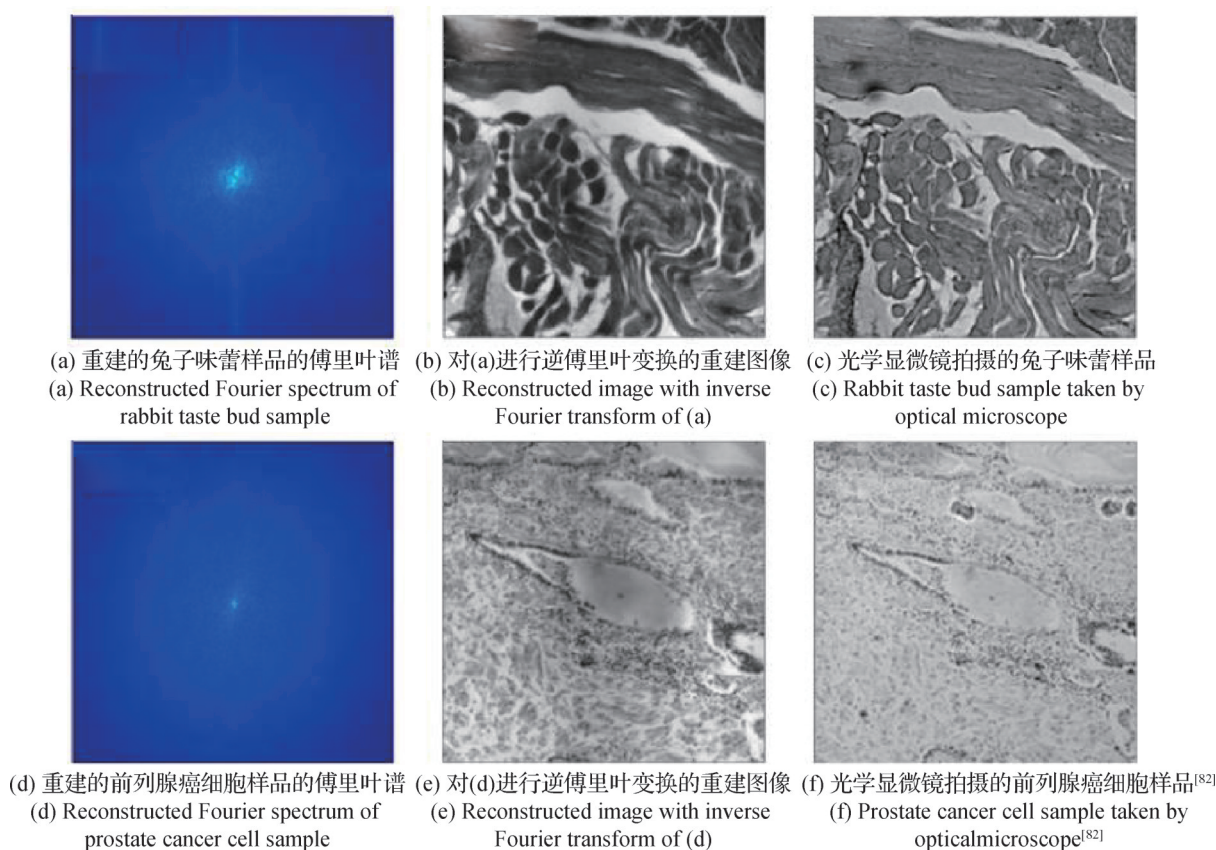


图 12 傅里叶单像素成像结果和光学显微镜成像结果

Fig.12 Fourier single-pixel imaging results and optical microscope imaging results

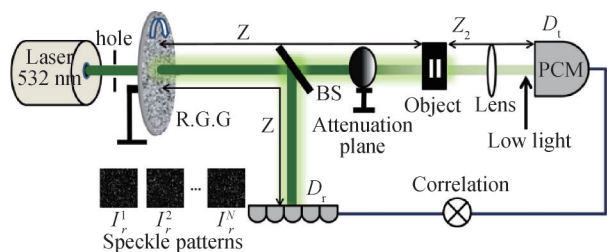


图 13 弱光下的量子关联成像^[83]

Fig.13 Quantum correlated imaging at low light levels^[83]

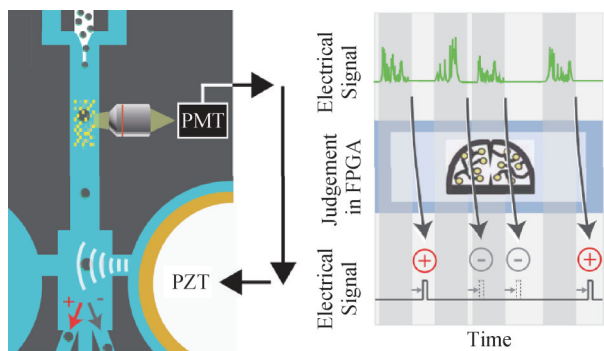
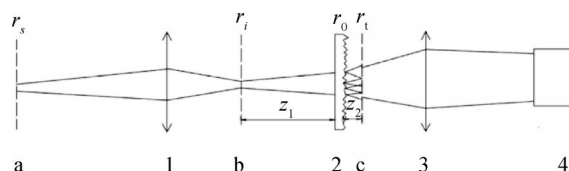


图 14 鬼细胞分析仪^[65]

Fig.14 Ghost cytometry^[65]

2019年, Li W W (李文文) 等人^[68] 搭建了一台基于稀疏约束鬼成像 (GISC) 光谱相机的超分辨荧光显微镜。GISC 光谱相机是利用鬼成像技术和压缩感知理论, 经过前期参考光标定, 实现单次曝光的光谱成像技术^[84], 其原理图如图 15 所示^[85]。GISC 光谱相机的主要想法是: 预先标定不同波长的准单色点源, 从第一成像面上各点到散斑成像面的映射过程, 相当于获得鬼成像中的测量矩阵。在成像时, 物体首先成像在第一成像面, 随后被 CCD 采集信号并排列成一个列向量, 再通过前期标定的测量矩阵并结合压缩感知算法便能



注: a-物面; 1-前置成像系统; b-第一成像面; 2-空间随机相位调制器; c-散斑成像面; 3-显微镜; 4-CCD 探测器。

图 15 GISC 光谱相机原理图^[85]

Fig.15 Schematic of GISC spectral camera^[85]

重建出不同波段下的成像结果。在标定时，CCD上每个像素点相当于传统鬼成像中的一个桶探测器，GISC光谱相机将鬼成像中的时域平均转化成空间平均，因此在成像阶段只需采集一次便能获得结果。基于此，李文文等人改造了一台荧光显微镜，如图16所示^[68]，在荧光收集端加入了一个空间随机相位调制器（RPM，此处是毛玻璃）用以调制荧光信号。在标定阶段，首先获得成像面上不同位置的荧光信号经过RPM后的散斑场，并将他们组合成测量矩阵。成像时获得的散斑场做为物光信号，通过关联计算即可恢复物体信息。利用实验获得的散斑场进行仿真，并结合压缩感知算法，GISC超分辨荧光显微镜获得了80 nm的分辨率。此外。GISC超分辨荧光显微技术还能与STORM技术结合，可以对高密度的荧光分子进行高精度定位^[68, 86]。

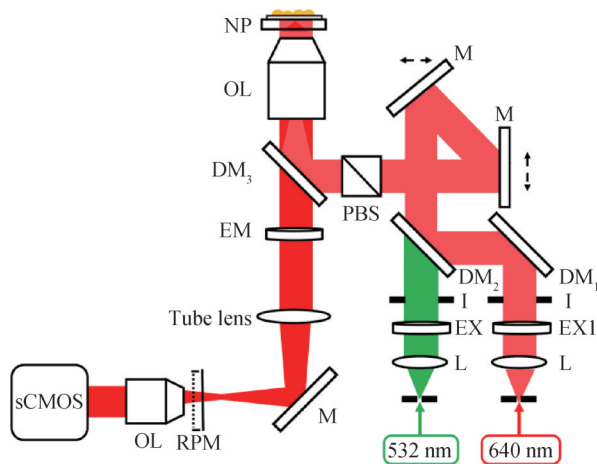


图16 基于GISC的超分辨荧光显微镜^[68]
Fig.16 Setup of GISC nanoscopy^[68]

2020年，Vinu等人^[70]结合鬼衍射和相干全息技术提出了鬼衍射全息显微成像，该方法的原理如图17所示。非相干光源经分束器后分成两路，一路(u_1)经过物体后被探测器D1探测，另一路(u_2)不经过物体直接被探测器D2探测，并且这两路光都同时叠加一个参考光场 u_R 。根据相干全息^[87-90]原理，两个探测器得到的散斑场进行关联运算后通过数字图像处理过程便能恢复复值物体的振幅和相位信息。该方法也将关联成像中的时间平均转换成了空间平均，因此通过单次采样便能恢复物体信息。其数字图像处理过程如图18所

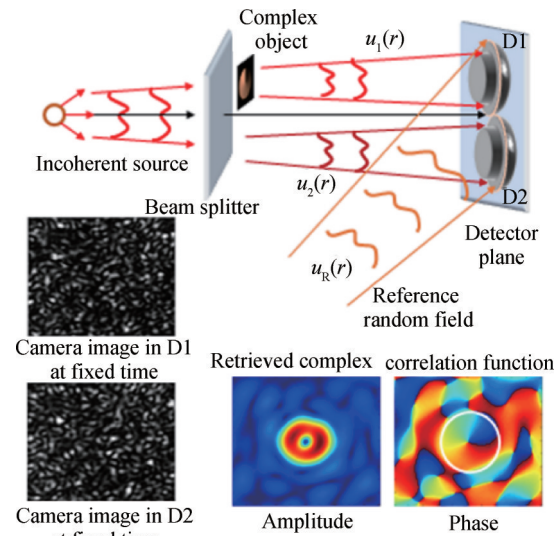


图17 鬼衍射全息显微镜原理图^[70]
Fig.17 Schematic of ghost diffraction holographic microscope^[70]

示，两个散斑场经过关联计算后得到一幅鬼关联全息图，对全息图傅里叶变换，然后滤波去掉共轭和直流分量，接着逆傅里叶变换回到空间域，最后再通过角谱传播的方法传输到特定平面从而获得物体的振幅和相位信息。该方法结合鬼成像和全息显微技术实现了对物体振幅和相位信息的同步定量测量，系统最小能分辨USAF 1951分辨率板上缝宽为3.9 μm 的缝。

2021年，英国格拉斯哥大学Padgett等人^[75]领导的一个国际团队，利用飞行时间3D成像和光束整形技术，提出了一种通过多模光纤的飞行时间3D成像方法。该方法示意图如图19中A部分所示，脉冲激光源经分束器分成两束光，一束光被光电探测器（PD）接收作为参考时间信号，另一束光经过DMD调制后通过一根照明多模光纤（Illumination）对待成像的场景进行点扫描，随后另一根收集多模光纤将场景散射的光直接收集到APD中，根据脉冲到达时间和峰值，可实现3D成像。在成像前，需先对照明多模光纤进行标定，即通过控制DMD使得光束通过照明多模光纤后在场景中不同位置处进行聚焦。在成像时则可直接利用标定的结果控制DMD，以实现场景的点扫描。图19中B部分表示直接拍摄的场景，C部分表示不同时刻旋转场景时该成像系统重建的结果，不同颜色代表深度信息不同。该方法能够以5 Hz的帧率，对一根长40 cm，纤芯直径为50 μm 的多

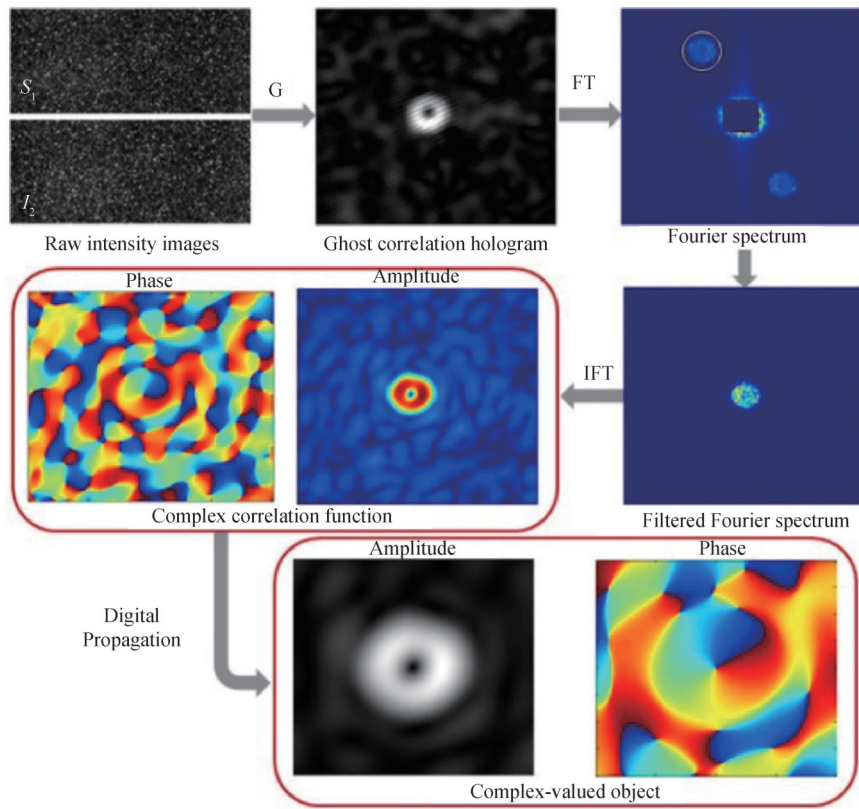


图 18 鬼衍射显微镜的数字图像处理过程^[70]

Fig.18 Digital image processing of ghost diffraction microscope^[70]

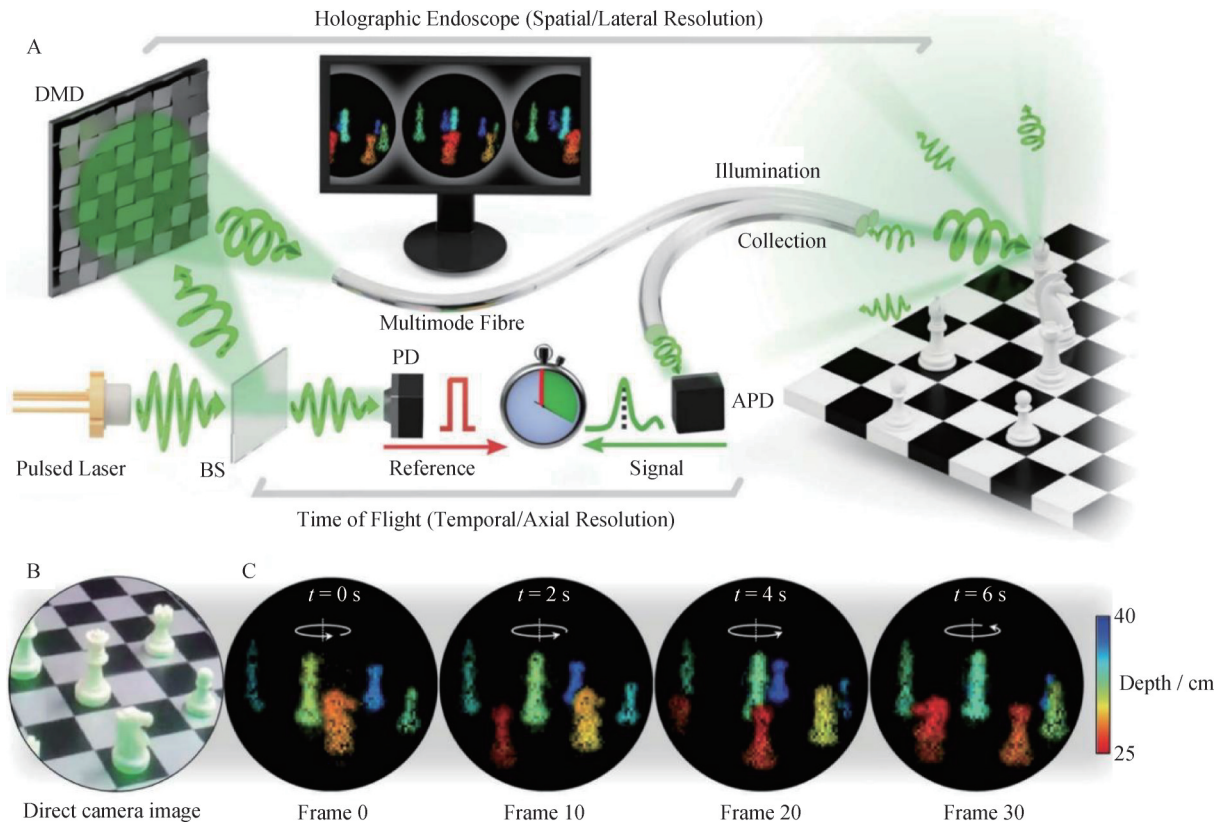


图 19 通过多模光纤的飞行时间 3D 成像^[75]

Fig.19 Time-of-flight 3D imaging through multimode optical fibers^[75]

模光纤末端几米外的移动物体进行3D成像,每秒能够扫描约23 000个点。此工作极大的推进了单像素成像技术在显微内窥领域的应用,并有望在临床上得到使用。

2021年,冯悦姝等人^[72]对一台科研级的正置荧光显微镜的光源、内部光路进行了重新设计,采用多分辨率Hadamard优化矩阵作为DMD的采样图样,实现了对生物组织样品的连续多分辨率成像。2022年,笔者课题组提出了临界分辨率和R值(R Value)的概念,用以定量分析和讨论量子关联成像系统中成像物体恰好可以分辨时物面上散斑颗粒大小问题^[91]。这可以看作是对基于点源的瑞利判据^[92]的推广,当物体尺寸趋向于0时,临界分辨率的概念等价于瑞利判据。经研究结果表明:在极限情况下,临界分辨率等于物面上散斑颗粒的大小^[91],这一结论可应用在量子关联成像的分辨率的研究中。随后,笔者课题组还提出了利用涡旋光束提高量子关联成像系统临界分辨率的方法,发现使用涡旋光束能够使得临界分辨率超越瑞利衍射极限^[93]。同年,Hong等人使用近场照明的方式,实现了3D显微单像素成像^[77]。此外,近些年来光声成像与量子关联成像结合研究也在逐渐增多^[94-99]。

3 总结

经过多年的发展,关于量子关联成像的研究逐渐从理论走向实际应用。一方面,高灵敏度、非局域成像、有较强抗干扰能力和高分辨力等特性使得量子关联成像在显微成像领域具有独特优势,并在近些年来得到迅速发展;从基于量子源的少光子关联成像和稀疏光子显微镜到基于经典源的压缩单像素全息、单帧宽场纳米镜、鬼衍射全息显微镜和通过多模光纤的飞行时间3D成像等,都在逐步推动着量子关联成像在显微成像中的深入研究。但另一方面,如何根据生物组织特性以及结合生物成像和临床需求进行基于量子关联的显微成像的研究也是一个急需解决的问题。

从光源的角度看,量子光源和经典光源在基于量子关联的显微成像中各具优势,量子光源的产生成本较高且装置较为复杂,但量子光源光强较弱且探测过程具有更高的动态范围^[100],在生物

样品成像研究中更具优势;而经典源则相对易于产生且成本较低,在实际应用中更有前景。此外,量子关联成像没有波长的限制,可应用在非可见光波段的显微成像应用,例如太赫兹显微成像^[101-104],X射线成像^[105-108]等。量子关联成像也有望融合进其它显微成像技术,以提高成像质量,例如拉曼散射成像^[55, 109, 110]、光热成像^[111-113]等。

参考文献

- [1] GUSTAFSSON M G. Surpassing the lateral resolution limit by a factor of two using structured illumination microscopy [J]. *Journal of Microscopy*, 2000, 198(2): 82 - 87.
- [2] HELL S W, WICHMANN J. Breaking the diffraction resolution limit by stimulated emission: Stimulated-emission-depletion fluorescence microscopy [J]. *Optics Letters*, 1994, 19(11): 780 - 782.
- [3] BETZIG E, PATTERSON G H, SOUGRAT R, et al. Imaging intracellular fluorescent proteins at nanometer resolution [J]. *Science*, 2006, 313(5793): 1642 - 1645.
- [4] RUST M J, BATES M, ZHUANG X. Sub-diffraction-limit imaging by stochastic optical reconstruction microscopy (storm) [J]. *Nature Methods*, 2006, 3(10): 793 - 795.
- [5] EDITORIAL. Artifacts of light [J]. *Nature Methods*, 2013, 10(12): 1135.
- [6] WALDCHEN S, LEHMANN J, KLEIN T, et al. Light-induced cell damage in live-cell super-resolution microscopy [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5(1): 15348.
- [7] SCHERMELLEH L, FERRAND A, HUSER T, et al. Super-resolution microscopy demystified [J]. *Nature Cell Biology*, 2019, 21(1): 72 - 84.
- [8] BULLEN A. Microscopic imaging techniques for drug discovery [J]. *Nature Reviews Drug Discovery*, 2008, 7(1): 54 - 67.
- [9] DIEDERICH B, LACHMANN R, CARLSTEDT S, et al. A versatile and customizable low-cost 3D-printed open standard for microscopic imaging [J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 5979.
- [10] 李强, 任冬梅, 兰一兵, 等. 用于纳米级表面形貌测量的光学显微测头 [J]. *计测技术*, 2022, 42: 91 - 96.
LI Q, REN D M, LAN Y B, et al. Optical microscope probe for the measurement of nano-scale topography [J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2022, 42(2): 91 - 96. (in Chinese)
- [11] 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.
- [12] CHENG J, HAN S. Incoherent coincidence imaging and its applicability in X-ray diffraction[J]. *Physical Review Letters*, 2004, 92(9): 093903.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] LIU X F, CHEN X H, YAO X R, et al. Lensless ghost imaging with sunlight[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(8): 2314 – 2317.
- [17] KOLOBOV M I. *Quantum imaging*[M]. Springer Science and Business Media, 2007.
- [18] 汪凯戈. *高等物理光学*[M]. 北京: 高等教育出版社, 2021.
- WANG K G. *Advanced physical optics* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2021. (in Chinese)
- [19] SHAPIRO J H. Computational ghost imaging[J]. *Physical Review A*, 2008, 78(6): 061802.
- [20] BROMBERG Y, KATZ O, SILBERBERG Y. Ghost imaging with a single detector[J]. *Physical Review A*, 2009, 79(5): 053840.
- [21] ABETAMANN M, BAYER M. Compressive adaptive computational ghost imaging[J]. *Scientific Reports*, 2013, 3(1): 1545.
- [22] YU W K, LI M F, YAO X R, et al. Adaptive compressive ghost imaging based on wavelet trees and sparse representation[J]. *Optics Express*, 2014, 22(6): 7133 – 7144.
- [23] KATZ O, BROMBERG Y, SILBERBERG Y. Compressive ghost imaging[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95(13): 131110.
- [24] ZHANG M, WEI Q, SHEN X, et al. Lensless fourier-transform ghost imaging with classical incoherent light [J]. *Physical Review A*, 2007, 75(2): 021803.
- [25] SEN P, CHEN B, GARG G, et al. Dual photography[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2005, 24(3): 745–755.
- [26] DUARTE M F, DAVENPORT M A, TAKHAR D, et al. Single-pixel imaging via compressive sampling[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2008, 25(2): 83 – 91.
- [27] SUN B, EDGAR M P, BOWMAN R, et al. 3D computational imaging with single-pixel detectors[J]. *Science*, 2013, 340(6134): 844 – 847.
- [28] 翟鑫亮, 吴晓燕, 孙艺玮, 等. 单像素成像理论与方法(特邀)[J]. *红外与激光工程*, 2021, 50(12): 1 – 14.
- ZHAI X L, WU X Y, SUN Y W, et al. Theory and approach of single-pixel imaging (Invited)[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(12): 1 – 14. (in Chinese)
- [29] 刘瑞丰, 赵书朋, 李福利. 单像素复振幅成像[J]. *红外与激光工程*, 2021, 50(12): 89 – 104.
- LIU R F, ZHAO S P, LI F L. Single-pixel complex amplitude imaging[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(12): 89 – 104. (in Chinese)
- [30] GIBSON G M, JOHNSON S D, PADGETT M J. Single-pixel imaging 12 years on: A review[J]. *Optics Express*, 2020, 28(19): 28190 – 28208.
- [31] TONG Z S, LIU Z T, HU C Y, et al. Preconditioned deconvolution method for high-resolution ghost imaging[J]. *Photonics Research*, 2021, 9(6): 1069 – 1077.
- [32] FERRI F, MAGATTI D, GATTI A, et al. High-resolution ghost image and ghost diffraction experiments with thermal light[J]. *Physical Review Letters*, 2005, 94(18): 183602.
- [33] GONG W, HAN S. High-resolution far-field ghost imaging via sparsity constraint[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5(1): 9280.
- [34] GAO Y, BAI Y, FU X. Point-spread function in ghost imaging system with thermal light[J]. *Optics Express*, 2016, 24(22): 25856 – 25866.
- [35] CHAN K W C, SIMON D S, SERGIENKO A V, et al. Theoretical analysis of quantum ghost imaging through turbulence[J]. *Physical Review A*, 2011, 84(4): 043807.
- [36] GONG W, HAN S. Correlated imaging in scattering media [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(3): 394 – 396.
- [37] MEYERS R E, DEACON K S, SHIH Y. Turbulence-free ghost imaging[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 98(11): 111115.
- [38] XU Y K, LIU W T, ZHANG E F, et al. Is ghost imaging intrinsically more powerful against scattering?[J]. *Optics Express*, 2015, 23(26): 32993 – 33000.
- [39] GATTI A, BRAMBILLA E, BACHE M, et al. Correlated imaging, quantum and classical[J]. *Physical Review A*, 2004, 70(1): 013802.
- [40] BAI Y F, HAN S S. Ghost imaging with thermal light by third-order correlation[J]. *Physical Review A*, 2007, 76(4): 043828.

- [41] 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.
- [42] CHAN K W, O'SULLIVAN M N, BOYD R W. High-order thermal ghost imaging [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(21): 3343 – 3345.
- [43] KUPLICKI K, CHAN K W C. High-order ghost imaging using non-rayleigh speckle sources [J]. *Optics Express*, 2016, 24(23): 26766 – 26776.
- [44] FERRI F, MAGATTI D, LUGIATO L A, et al. Differential ghost imaging [J]. *Physical Review Letters*, 2010, 104(25): 253603.
- [45] BINA M, MAGATTI D, MOLteni M, et al. Backscattering differential ghost imaging in turbid media [J]. *Physical Review Letters*, 2013, 110(8): 083901.
- [46] LI M F, ZHANG Y R, LUO K H, et al. Time-correspondence differential ghost imaging [J]. *Physical Review A*, 2013, 87(3): 033813.
- [47] ZHANG C, GUO S X, CAO J S, et al. Object reconstruction using pseudo-inverse for ghost imaging [J]. *Optics Express*, 2014, 22(24): 30063 – 30073.
- [48] GONG W L. High-resolution pseudo-inverse ghost imaging [J]. *Photonics Research*, 2015, 3(5): 234 – 237.
- [49] LV X F, GUO S X, WANG C L, et al. Experimental investigation of iterative pseudoinverse ghost imaging [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(3): 1 – 8.
- [50] SUN S, LIU W T, GU J H, et al. Ghost imaging normalized by second-order coherence [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(24): 5993 – 5996.
- [51] BRIDA G, GENOVESE M, BERCHERA I R. Experimental realization of sub-shot-noise quantum imaging [J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(4): 227 – 230.
- [52] LEMOS G B, BORISH V, COLE G D, et al. Quantum imaging with undetected photons [J]. *Nature*, 2014, 512(7515): 409 – 412.
- [53] DEFLENNE H, REICHERT M, FLEISCHER J W, et al. Quantum image distillation [J]. *Science Advances*, 2019, 5(10): eaax0307.
- [54] MOREAU P A, TONINELLI E, GREGORY T, et al. Imaging with quantum states of light [J]. *Nature Reviews Physics*, 2019, 1(6): 367 – 380.
- [55] CASACIO C A, MADSEN L S, TERRASSON A, et al. Quantum-enhanced nonlinear microscopy [J]. *Nature*, 2021, 594(7862): 201 – 206.
- [56] MORRIS P A, ASPDEN R S, BELL J E, et al. Imaging with a small number of photons [J]. *Nature Communications*, 2015, 6(1): 5913.
- [57] 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.
- [58] 夏传青, 武腾飞, 曹士英, 等. 基于光频梳的乙炔稳频 1542 nm 激光波长测量研究 [J]. *计测技术*, 2022, 42(4): 83 – 88.
- XIA C Q, WU T F, CAO S Y, et al. Wavelength measurement of acetylene-stabilized laser at 1542nm using optical frequency combs [J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2022, 42(4): 83 – 88. (in Chinese)
- [59] LOSERO E, RUO-BERCHERA L, MEDA A, et al. Quantum differential ghost microscopy [J]. *Physical Review A*, 2019, 100(6): 63818. 1 – 63818. 9.
- [60] ZHANG P, GONG W, SHEN X, et al. Improving resolution by the second-order correlation of light fields [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(8): 1222 – 1224.
- [61] STUDER V, BOBIN J, CHAHID M, et al. Compressive fluorescence microscopy for biological and hyperspectral imaging [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, 109(26): E1679 – E1687.
- [62] CLEMENTE P, DURAN V, TAJAHUERCE E, et al. Single-pixel digital ghost holography [J]. *Physical Review A*, 2012, 86(4): 041803.
- [63] YU W K, YAO X R, LIU X F, et al. Compressive microscopic imaging with "positive-negative" light modulation [J]. *Optics Communications*, 2016, 371: 105 – 111.
- [64] ZHANG Z, WANG X, ZHENG G, et al. Hadamard single-pixel imaging versus fourier single-pixel imaging [J]. *Optics Express*, 2017, 25(16): 19619 – 19639.
- [65] OTA S, HORISAKI R, KAWAMURA Y, et al. Ghost cytometry [J]. *Science*, 2018, 360(6394): 1246 – 1251.
- [66] PENG J, YAO M, CHENG J, et al. Micro-tomography via single-pixel imaging [J]. *Optics Express*, 2018, 26(24): 31094 – 31105.
- [67] ILINA E, NYMAN M, SVAGZDYTE I, et al. Aberration-insensitive microscopy using optical field-correlation imaging [J]. *APL Photonics*, 2019, 4(6): 066102.
- [68] LI W W, TONG Z S, XIAO K, et al. Single-frame wide-field nanoscopy based on ghost imaging via sparsity constraints [J]. *Optica*, 2019, 6(12): 1515 – 1523.
- [69] 张子邦, 陆天傲, 彭军政, 等. 傅里叶单像素成像技

- 术与应用[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(6): 12 - 30.
- ZHANG Z B, LU T A, PENG J Z, et al. Fourier single-pixel imaging techniques and applications[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(6): 12 - 30. (in Chinese)
- [70] VINU R V, CHEN Z Y, SINGH R K, et al. Ghost diffraction holographic microscopy[J]. Optica, 2020, 7(12): 1697 - 1704.
- [71] KHASANOV I S, ZYKOVA L. Can the ghost imaging increase the lateral resolution of surface plasmon resonance microscopy? [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1636(1): 012039.
- [72] 冯悦姝, 周成, 刘轩, 等. 基于hadamard优化矩阵的多分辨显微关联成像研究[J]. 光学学报, 2021, 41(21): 116 - 124.
- FENG Y S, ZHOU C, LIU X, et al. Study of multi-resolution microscopic correlation imaging based on optimization hadamard matrix[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(21): 116 - 124. (in Chinese)
- [73] SUN Z, TUITJE F, SPIELMANN C. A review of high-resolution microscopic ghost imaging with a low-dose pseudo-thermal light [J]. Journal of Microscopy, 2021, 284(1): 3 - 11.
- [74] 钟金钢, 姚曼虹, 彭军政. 计算傅里叶显微成像研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(18): 211 - 226.
- ZHONG J G, YAO M H, PENG J Z. Process in computational fourier microscopy [J]. Laser and Optoelectronics Progress, 2021, 58(18): 211 - 226. (in Chinese)
- [75] STELLINGA D, PHILLIPS D B, MEKHAIL S P, et al. Time-of-flight 3D imaging through multimode optical fibers [J]. Science, 2021, 374(6573): 1395 - 1399.
- [76] LUDWIG S, PEDRINI G, PENG X, et al. Single-pixel scatter-plate microscopy [J]. Optics Letters, 2021, 46(10): 2473 - 2476.
- [77] HONG P L, LIANG Y. Three-dimensional microscopic single-pixel imaging with chaotic light [J]. Physical Review A, 2022, 105(2): 023506.
- [78] CLEMENTE P, DURAN V, TAJAHUERCE E, et al. Compressive holography with a single-pixel detector[J]. Optics Letters, 2013, 38(14): 2524 - 2527.
- [79] MARTINEZ-LEON L, CLEMENTE P, MORI Y, et al. Single-pixel digital holography with phase-encoded illumination[J]. Optics Express, 2017, 25(5): 4975 - 4984.
- [80] WU D, LUO J, HUANG G, et al. Imaging biological tissue with high-throughput single-pixel compressive holography[J]. Nature Communications, 2021, 12(1): 4712.
- [81] ZHANG Z B, MA X, ZHONG J G. Single-pixel imaging by means of fourier spectrum acquisition[J]. Nature Communications, 2015, 6(1): 6225.
- [82] 张子邦. 傅里叶单像素成像技术[D]. 广东: 暨南大学, 2017.
- ZHANG Z B. Fourier single-pixel imaging [D]; Guangdong: Jinan University, 2017. (in Chinese)
- [83] SHI X H, LI H X, BAI Y F, et al. Negative influence of detector noise on ghost imaging based on the photon counting technique at low light levels [J]. Applied Optics, 2017, 56(26): 7320 - 7326.
- [84] 高泽东, 郝群, 刘宇, 等. 高光谱成像与应用技术发展[J]. 计测技术, 2019, 39(4): 24 - 34.
- GAO Z D, HAO Q, LIU Y, et al. Hyperspectral imaging and application technology development [J]. Metrology & Measurement Technology, 2019, 39(4): 24 - 34. (in Chinese)
- [85] LIU Z, TAN S, WU J, et al. Spectral camera based on ghost imaging via sparsity constraints [J]. Scientific Reports, 2016, 6(1): 25718.
- [86] 李文文, 王中阳. 基于量子关联的超分辨荧光显微技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(10): 158 - 172.
- LI W W, WANG Z Y. Research progress of super-resolution fluorescence microscopy based on quantum correlation [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(10): 158 - 172. (in Chinese)
- [87] TAKEDA M, WANG W, DUAN Z, et al. Coherence holography[J]. Optics Express, 2005, 13(23): 9629-9635.
- [88] NAIK D N, SINGH R K, EZAWA T, et al. Photon correlation holography[J]. Optics Express, 2011, 19(2): 1408 - 1421.
- [89] 陈子阳, 陈丽, 范伟如, 等. 基于相关全息原理的散射成像技术及其进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(2): 1 - 14.
- CHEN Z Y, CHEN L, FAN W R, et al. Progress on scattering imaging technologies based on correlation holography [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(2): 1 - 14. (in Chinese)
- [90] SARKAR T, MANDAL A C, ZIYANG C, et al. Correlation holography with a single-pixel detector: A review[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(10): 140 - 157.
- [91] TAN W, HUANG X W, JIANG T, et al. Critical resolution in ghost imaging system with pseudo-thermal light [J]. Results in Physics, 2022, 32: 105104.
- [92] RAYLEIGH L. Investigations in optics, with special refer-

- ence to the spectroscope [J]. *Philosophical Magazine*, 1879, 8(49): 261 – 274.
- [93] TAN W, BAI Y, HUANG X, et al. Enhancing critical resolution of a ghost imaging system by using a vortex beam [J]. *Optics Express*, 2022, 30(9): 14061 – 14072.
- [94] HUYNH N, ZHANG E, BETCKE M, et al. Single-pixel optical camera for video rate ultrasonic imaging [J]. *Optica*, 2016, 3(1): 26 – 29.
- [95] YANG J, GONG L, XU X, et al. Motionless volumetric photoacoustic microscopy with spatially invariant resolution [J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 1 – 7.
- [96] CARAVACA-AGUIRRE A M, SINGH S, LABOUESSE S, et al. Hybrid photoacoustic-fluorescence microendoscopy through a multimode fiber using speckle illumination [J]. *APL Photonics*, 2019, 4(9): 096103.
- [97] SONG X, YU X, WANG R, et al. Multiscale photoacoustic imaging without motion using single-pixel imaging [J]. *Journal of Biophotonics*, 2022, 15(3): e202100299.
- [98] TORKE P R, NUSTER R, PALTAUF G. Photoacoustic computational ghost imaging [J]. *Optics Letters*, 2022, 47(6): 1462 – 1465.
- [99] CHEN N, YU J, LIU L, et al. Video-rate high-resolution single-pixel non-scanning photoacoustic microscopy [J]. *Biomedical Optics Express*, 2022, 13(7): 3823 – 3835.
- [100] SHIBUYA K, ARAKI H, IWATA T. Photon-counting-based diffraction phase microscopy combined with single-pixel imaging [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2018, 57(4): 042501.
- [101] STANTCHEV R I, SUN B, HORNETT S M, et al. Non-invasive, near-field terahertz imaging of hidden objects using a single-pixel detector [J]. *Science Advances*, 2016, 2(6): e1600190.
- [102] OLIVIERI L, TOTERO GONGORA J S, PASQUAZI A, et al. Time-resolved nonlinear ghost imaging [J]. *ACS Photonics*, 2018, 5(8): 3379 – 3388.
- [103] CHEN S C, FENG Z, LI J, et al. Ghost spintronic thz-emitter-array microscope [J]. *Light Science and Applications*, 2020, 9(1): 99.
- [104] OLIVIERI L, GONGORA J S T, PETERS L, et al. Hyperspectral terahertz microscopy via nonlinear ghost imaging [J]. *Optica*, 2020, 7(2): 186 – 191.
- [105] PELLICCIA D, RACK A, SCHEEL M, et al. Experimental X-ray ghost imaging [J]. *Physical Review Letters*, 2016, 117(11): 113902.
- [106] YU H, LU R, HAN S, et al. Fourier-transform ghost imaging with hard X rays [J]. *Physical Review Letters*, 2016, 117(11): 113901.
- [107] 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.
- [108] OLBINADO M P, PAGANIN D M, CHENG Y, et al. X-ray phase-contrast ghost imaging using a single-pixel camera [J]. *Optica*, 2021, 8(12): 1538 – 1544.
- [109] FREUDIGER C W, MIN W, SAAR B G, et al. Label-free biomedical imaging with high sensitivity by stimulated raman scattering microscopy [J]. *Science*, 2008, 322(5909): 1857 – 1861.
- [110] CHENG J X, XIE X S. Vibrational spectroscopic imaging of living systems: An emerging platform for biology and medicine [J]. *Science*, 2015, 350(6264): aaa8870.
- [111] ZHANG D, LI C, ZHANG C, et al. Depth-resolved mid-infrared photothermal imaging of living cells and organisms with submicrometer spatial resolution [J]. *Science Advances*, 2016, 2(9): e1600521.
- [112] ADHIKARI S, SPAETH P, KAR A, et al. Photothermal microscopy: Imaging the optical absorption of single nanoparticles and single molecules [J]. *ACS Nano*, 2020, 14(12): 16414 – 16445.
- [113] BAI Y, YIN J, CHENG J X. Bond-selective imaging by optically sensing the mid-infrared photothermal effect [J]. *Science Advances*, 2021, 7(20): eabg1559.

(本文编辑: 朱俊真)



第一作者: 朱孝辉 (1997—), 男, 博士研究生, 主要从事事情激光传输与量子关联成像等方面的研究。



通讯作者: 傅喜泉 (1977—), 男, 教授, 博士, 主要从事量子信息技术、空间光通信、光电信号检测和信号处理等方面的研究。