

运动物体关联成像研究现状及展望

刘伟涛^{1,2*†}, 孙帅^{1,2†}, 胡宏康^{1,2}, 林惠祖^{1,2}

¹国防科技大学文理学院物理系, 湖南 长沙 410073;

²国防科技大学量子信息学科交叉中心, 湖南 长沙 410073

摘要 关联成像是一种基于光场高阶关联获取物体信息的新型主动成像机制, 具有高灵敏、抗干扰等特点, 在生物医学、遥感成像等领域有广阔的应用前景。关联成像需要多次采样来重构物体图像, 成像过程需要一定的时间, 在此期间物体和成像系统的相对运动会导致图像质量退化。如何提升对运动物体的成像能力是关联成像走向应用需要解决的关键问题之一。简要回顾了关联成像的基本概念, 详细介绍了运动物体关联成像的原理方法、发展历程及研究现状, 比较了所述技术所适用的场景并展望了其发展趋势。

关键词 成像系统; 关联成像; 运动模糊; 成像质量; 追踪成像

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1011001

Progress and Prospect for Ghost Imaging of Moving Objects

Liu Weitao^{1,2*†}, Sun Shuai^{1,2†}, Hu Hongkang^{1,2}, Lin Huizu^{1,2}

¹Department of Physics, College of Liberal Arts and Science, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China;

²Interdisciplinary Center of Quantum Information, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

Abstract Ghost imaging is a novel active imaging technique in which the information of the object is obtained based on high-order correlation of light fields. It has the characteristics of high sensitivity and anti-interference, and has broad application prospects in biomedicine, remote sensing imaging, and other fields. Ghost imaging requires multiple samplings to reconstruct the object image, and the imaging process takes a certain time, during which the relative motion between the object and the imaging system will lead to the degradation of image quality. How to improve the performance of imaging for moving objects is one of the key problems to be solved in the application of correlation imaging. In this paper, the basic concepts of ghost imaging are briefly reviewed; the principle of method, development, and current status of ghost imaging for moving objects are introduced. The applicable scenarios of the proposed technique are compared and the development trend is forecasted

Key words imaging systems; ghost imaging; motion blur; quality of imaging; tracking and imaging

OCIS codes 110.4153; 110.2945; 110.4280; 110.2970

1 引言

光学成像是人类获取信息的重要途径之一, 为人们的生活和科学研究提供了有力工具。传统

的光学成像通过测量物体表面的光强分布获取图像, 是基于光场一阶性质的成像方式。20 世纪 80 年代, 量子信息技术方兴未艾^[1], 科学家基于纠缠光子对的特性提出了鬼成像方案^[2-3]。作为一种

收稿日期: 2021-01-20; 修回日期: 2021-03-18; 录用日期: 2021-03-25

基金项目: 国家自然科学基金(11774431, 61701511)

* E-mail: wtlou@nudt.edu.cn

† 共同第一作者

新的成像机制,鬼成像在诸多方面表现出了不同于传统成像的特点,受到了人们的广泛关注。

鬼成像,也称关联成像,是一种基于光场高阶关联获取物体信息的主动成像技术。所谓主动成像,是指使用人造光源主动照明物体并实现成像。关联成像系统中采用了两束具有空间关联的光:一束称为参考臂光,经自由传播后其光强空间分布被记录下来;另一束称为物臂光,经过物体后由一个没有空间分辨能力的点探测器收集(孔径内能量被透镜收集至一点,这种探测方式也称桶探测)。两路光均不能单独对物体进行成像,而物体信息可以通过两路光的强度关联得到。

和传统成像相比,关联成像在诸多方面具有显著优势。从成像鲁棒性来说,关联成像采用统计测量,可以抑制与光源统计无关的噪声^[4-8]。从探测器角度来说,桶探测采用的单元探测器件在技术上往往比面阵探测器件具备更优性能,这使得关联成像可以在更弱回波条件下实现^[9-13]。从成像所需器件来说,关联成像不需要阵列探测器件,可实现无透镜成像,并且可拓展至 X 光^[14-19],中、远红外^[20-21],太赫兹 (THz) 波^[22-24] 等一些难以实现面阵探测或难以获取可用的成像透镜的波段。在成像算法方面,关联成像可以结合压缩感知^[25-29]、机器学习^[30-33] 等提高成像质量。基于以上优点,关联成像在生物医学成像^[9,18,20,34-35]、激光雷达^[5-6,36-38]、图像加密^[39-42] 等领域具有广泛前景。

很多实际应用常需要对运动物体进行成像,如活细胞成像、安全监控、空中预警等。此外,将关联成像系统装配至运动平台也面临成像系统和目标相对运动的问题。对于传统成像,物体和成像系统的相对运动会导致图像分辨率下降。关联成像需要多次测量来重构物体图像,物体运动也会导致运动模糊甚至无法成像。同时,由于成像机制不同,运动物体的关联成像又表现出了不同于传统成像的特点。现今,如何提升对运动物体成像的性能,是关联成像走向应用面临的核心问题之一。本文将介绍实现运动物体关联成像需要解决的理论和 technical 问题,并从历史、现状、发展趋势等方面对运动物体关联成像进行进一步的回顾与探讨。

2 热光关联成像

最初的鬼成像实验利用了光子对的纠缠性质,后续研究发现基于纠缠光和(赝)热光均可实现关联成像^[43-46]。现有条件下,高亮度的(赝)热光源比纠

缠源更易制备,因此(赝)热光关联成像得到了更广泛的研究^[47-52]。本节将简要回顾赝热光关联成像的光源性质和成像原理,这将作为本文后续讨论的基础。

2.1 赝热光

热辐射过程形成的光场被称为热光。在该过程中,大量的原子或分子被激发到高能级,然后随机地、独立地跃迁到低能级并辐射光子。因此单模热光场中某一时空点的光子数分布和热平衡状态下玻色子在各能级上的粒子数分布相同^[53],为玻色-爱因斯坦分布,可以表示为

$$p(n) = \left[1 - \exp\left(-\frac{h\omega}{k_B T}\right) \right] \exp\left(-\frac{nh\omega}{k_B T}\right), \quad (1)$$

式中: n 为光子数; k_B 为玻尔兹曼常数; h 为约化普朗克常量; T 为辐射体温度; ω 为光子频率。此时的平均光子数可以表示为

$$\bar{n} = \sum_n n p(n) = \frac{1}{\exp\left(\frac{h\omega}{k_B T}\right) - 1}. \quad (2)$$

记 $\xi = \frac{h\omega}{k_B T}$, 当平均光子数 $\bar{n} \gg 1$ 时,通过(2)式可以得到 $e^\xi - 1 \approx 0$ 。根据一阶泰勒近似,有 $e^\xi - 1 \approx \xi$ 。于是(2)式可写为

$$\bar{n} = \frac{1}{\xi}. \quad (3)$$

将(3)式代入(1)式,可得单模热光场的光子数分布为

$$p(n) = \frac{e^\xi - 1}{e^\xi} e^{-\frac{n}{\bar{n}}} = (e^\xi - 1) e^{-\frac{n+1}{\bar{n}}} \approx \frac{1}{\bar{n}} e^{-\frac{n}{\bar{n}}}. \quad (4)$$

当平均光子数 $\bar{n} \gg 1$ 时,单模热光场的光强分布为

$$p(I) = \frac{1}{\bar{I}} e^{-\frac{I}{\bar{I}}}, \quad (5)$$

式中: I 为光强; \bar{I} 为平均光强。可以看出,单模热光场的光强分布服从负指数分布。热辐射过程是平稳随机过程,光场中固定位置光强的时间统计性质和固定时刻光强的空间统计性质相同。

在实际测量中,探测器记录的是光强在特定空间范围、时间长度内的积分结果。若探测时间(积分时间)小于或等于光场相干时间,则探测器能够记录光强随时间的涨落;若探测时间大于光场相干时间,则光子数的涨落效应被平均,此时记录的光子涨落程度变小甚至无涨落。自然界存在的热光场相干时间极短,现有的探测器响应时间不够快,只能记录多个相干时间内的平均值,这导致了热光场的涨落无法直接被准确探测。在实际应用中,研究人员常用

旋转的毛玻璃、空间光调制器等器件随机调制相干光,以产生有强度涨落的光场。调制器件各点引入相干光波前的随机强度或相位变化。各点相当于新的子源,由大量子源干涉形成的光场可以用于模拟大量原子或分子热辐射产生的光场涨落,因此通过这种方式产生的光场被称为赝热光。赝热光的相干时间取决于调制器件的刷新频率,其光强涨落便于探测。同时,大功率的赝热光源容易制备,因此赝热光源在关联成像的研究中得到了广泛应用。

2.2 赝热光关联成像

关联成像的物理本质一直是研究人员关心的问题。在关联成像发展的过程中,人们试图用不同的理论解释其成像机理,包括 Klyshko 模型^[3,44,54]、几何光学理论^[55]、双光子干涉模型^[56-57]和强度涨落关联理论^[58-59]。本文将从强度涨落关联理论出发探讨关联成像的原理,并引出运动物体关联成像的特点。

图 1 是典型的无透镜赝热光关联成像结构。光源经分束器被分为参考臂光和物臂光,其中 t 时刻的参考臂光的强度分布被面阵探测器记录为 $I(\boldsymbol{\rho}; t)$ 。物臂光传播至物体表面,经物体透射(或反射)后被桶探测器记录为 $B(t)$ 。通过两路光信号的二阶关联得到物体图像,可表示为

$$G(\boldsymbol{\rho}) = \frac{\langle I(\boldsymbol{\rho}; t)B(t) \rangle}{\langle I(\boldsymbol{\rho}; t) \rangle \langle B(t) \rangle}, \quad (6)$$

式中: $\langle \cdot \rangle$ 为时域上的系综平均。桶探测信号可以表示为

$$B(t) = \int O(\boldsymbol{\rho}_o) I(\boldsymbol{\rho}_o; t) d\boldsymbol{\rho}_o, \quad (7)$$

式中: $I(\boldsymbol{\rho}_o; t)$ 表示 t 时刻物体表面的光强分布; $O(\boldsymbol{\rho}_o)$ 表示物体反射(或透射)率函数。当不考虑光场传输和探测过程中引入的噪声时,将(7)式代入(6)式,可以得到

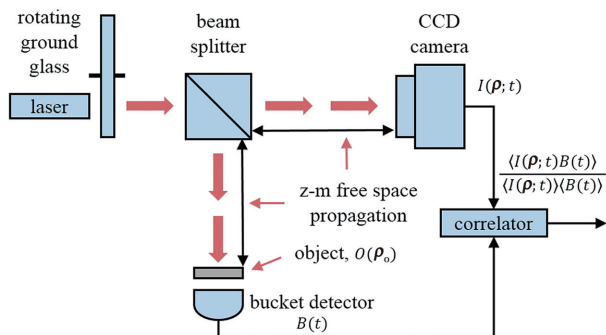


图 1 赝热光关联成像示意图

Fig. 1 Diagram of correlated imaging with pseudo-thermal light

$$G(\boldsymbol{\rho}) = \frac{1}{\int O(\boldsymbol{\rho}_o) d\boldsymbol{\rho}_o} \int O(\boldsymbol{\rho}_o) \times \frac{\langle I(\boldsymbol{\rho}; t)I(\boldsymbol{\rho}_o; t) \rangle}{\langle I(\boldsymbol{\rho}; t) \rangle \langle I(\boldsymbol{\rho}_o; t) \rangle} d\boldsymbol{\rho}_o. \quad (8)$$

记 $\alpha = \int O(\boldsymbol{\rho}_o) d\boldsymbol{\rho}_o, g^{(2)}(\boldsymbol{\rho}, \boldsymbol{\rho}_o) = \frac{\langle I(\boldsymbol{\rho}; t)I(\boldsymbol{\rho}_o; t) \rangle}{\langle I(\boldsymbol{\rho}; t) \rangle \langle I(\boldsymbol{\rho}_o; t) \rangle}$, 则(8)式可以写为

$$G(\boldsymbol{\rho}) = \frac{1}{\alpha} \int O(\boldsymbol{\rho}_o) g^{(2)}(\boldsymbol{\rho}, \boldsymbol{\rho}_o) d\boldsymbol{\rho}_o, \quad (9)$$

式中: $g^{(2)}(\boldsymbol{\rho}, \boldsymbol{\rho}_o)$ 表示参考臂光场和物体表面光场的二阶相干度^[60]。从(9)式可以看出,赝热光关联成像的结果可以表示为物体反射(或透射)率函数和赝热光场二阶相干度的卷积。对于光源无穷大的简单情况,赝热光场的二阶相干度可以表示为

$$g^{(2)}(\boldsymbol{\rho}, \boldsymbol{\rho}_o) = 1 + |\delta(\boldsymbol{\rho} - \boldsymbol{\rho}_o)|^2, \quad (10)$$

式中: $\delta(\cdot)$ 为 Dirac-Delta 函数。(9)式即为物体的图像。此外,通过(9)式还可以得出以下结论:

1) $g^{(2)}$ 函数在(9)式中作为卷积核出现,说明其在关联成像过程中的作用可类比一阶光学成像中的点扩展函数。

2) 实际情况需要考虑光源尺寸及光路中的其他光瞳,此时 δ 函数会有相应展宽,其半峰全宽受光源和光瞳尺寸的影响,且对应成像系统的分辨率。

3) α 和物体大小成反比,因此物体越大,成像对比度越低。

4) 上述讨论均基于无穷多次采样,实际中有限的采样次数 N 会影响成像信噪比。对于运动物体,关联成像系统需要在物体准静止的状态下实现尽可能多的采样,此时图像的信噪比和 \sqrt{N} 成正比。

本节基于强度涨落关联理论,从二阶关联函数出发推导了赝热光关联成像过程,并简要分析了成像质量的影响因素。在关联成像发展过程中,研究人员还提出利用 Fourier 光场^[61]、强度分布服从 Hadamard 矩阵特性的光场^[62]等作为光源,同时结合特定的算法实现关联成像。和赝热光关联成像类似,该方法的成像质量也受采样次数的影响,其原因在于桶探测的方式虽然降低了成像对探测器空间维度的要求,但同时需要更多的时间来实现成像。

3 运动物体关联成像

运动物体成像可以概括为对视场内物体进行实时的、清晰的辨认,这要求成像系统同时具备较高的时间分辨率和空间分辨率。传统成像中,在光学系

统参数一定的条件下,时间分辨率由相机曝光时间决定,空间分辨率由相机像素尺寸决定。在相机曝光时间内,物体的图像在感光面上的移动距离大于像素尺寸会导致图像空间分辨率下降。为了抑制运动模糊,常用的方法是缩短相机曝光时间。物体运动速度越高,相机曝光时间需越短。在此需求牵引下,超快摄影技术取得了长足发展^[63-66]。另一方面,在一些光源功率有限、物体快速运动的场景中,缩短曝光时间会导致积分时间内光子数减少,图像信噪比急剧降低,乃至无法辨认物体信息。

在关联成像中,图像分辨率由照明散斑相干长度决定,多次采样时间可以看作是关联成像的“积分”时间,这决定了成像系统的时间分辨率。在积分时间内,物体运动距离大于照明散斑的相干长度会导致运动模糊。因此,当成像系统参数一定,为了避免运动模糊,可进行成像的物体运动速度存在上限。2011年,曾贵华课题组对此问题进行了定量分析^[67]。他们考虑了物体横向运动的情况:对于采样频率为 f 、角分辨率为 θ_r 的成像系统,可成像的物体的平均角速度上限为

$$\omega' \leq \frac{f}{N} \theta_r, \quad (11)$$

式中: f/N 表示完成采样所需时间的倒数。(11)式说明,当物体的平均角速度小于成像系统的角分辨率和采样时间之比,成像无运动模糊;反之,则会导致图像分辨率下降。物体纵向运动的情况与横向运动类似,物体的纵向运动平均速度应小于照明散斑的纵向相干长度和采样时间之比。不同的是,当物体的纵向运动平均速度大于散斑纵向相干长度时,物体表面光场和参考臂光场退相关,导致无法成像^[68]。此外,关联成像的视场由光源照明区域决定,当物体运动至视场外,还需要系统对物体进行追踪照明。

从(11)式中可以看出,在不降低图像分辨率的前提下,为对更快速的运动物体进行成像,需要提升系统的采样频率、减少成像所需的采样次数,即提升成像速度。关联成像系统的采样过程包括激发光源、调制光场、探测信号三个环节,成像采样频率由以上环节中的频率最低者决定。常用的桶探测器带宽可达到 GHz 甚至更高,满足绝大部分场景中的运动物体回波探测对带宽的需求。因此提升成像系统的采样频率,主要包括提升光源重复频率和光场调制频率。在关联成像中,成像所需采样次数与成像策略、重构算法密切相关。根据实际场景采取适当

的成像策略以及开发先进的算法都可以减少成像所需采样次数。此外,在医疗、监测、遥感等场景中,实时获取运动物体信息具有重要意义。因此,适用于运动物体的先进成像算法,在减少成像所需采样次数的同时,应兼顾数据处理的时效性。

在一些场景中,利用运动物体的先验信息也可以大幅提升关联成像的能力。2012年,张聪等^[69]验证了在已知物体运动速度的条件下,可以通过对参考臂光场的位移补偿来对运动物体进行成像,此时不再需要对物体进行实时成像,而是可以在物体运动过程中逐渐获得物体的图像。因此,物体运动速度上限不再受(11)式限制,这也体现了关联成像机制和传统成像的不同。

基于上述特点,为了提升对运动物体的成像能力,研究人员提出了一系列实用的方法,这些方法的原理可以大致分为提高关联成像速度和利用先验信息两大类。

3.1 提高关联成像速度

3.1.1 研制高刷新频率的光源

如前文所述,研制高性能的(赝)热光源是提升关联成像能力的关键技术之一^[70]。(赝)热光源的性能参数包括刷新频率和平均功率。数字微镜器件(DMD)是常见的调制器之一。普通 DMD 的调制频率约为 20 kHz,成像帧频一般会限制在 10 Hz 量级^[71-73]。2018年,孙鸣捷课题组研制了高刷新频率的 LED 阵列光源,通过提升二极管组的开关速度实现了 500 kHz 的光场刷新频率,同时利用分辨率为 32×32 像素的 Hadamard 光场和强度关联算法对简单场景实现了 1000 Hz 的成像(图 2)^[74]。同年,西班牙课题组还用刷新频率为 10 kHz 的 LED 光源实现了 10 Hz 调制频率的 3D 物体成像^[75]。2019年,Zhao 等^[76]将 10×10 的 LED 光源阵列的刷新频率提升到 100 MHz,以光电倍增管作为探测器,在实验室内实现了 1.4 MHz 帧率的快速成像。遥感、自动驾驶等应用场景常需要实现远距离、大视场成像,此时不仅需要光源的刷新频率高,还需要脉冲光源有较高的峰值功率。在这方面,国外多个课题组进行了广泛、深入的研究。2015年,美国 HRL 实验室从理论上分析了伪随机排布的垂直腔面发射激光器(VCSEL)二维阵列作为可调制光源的可行性^[77]。他们认为,VCSEL 的功率高、调制速率可达 GHz 量级,是用于激光雷达的理想光源。2019年,日本神户大学研究小组提出用空间光调制器(SLM)控制 VCSEL 的相位,实现快速计算关联成像^[78]。同年,

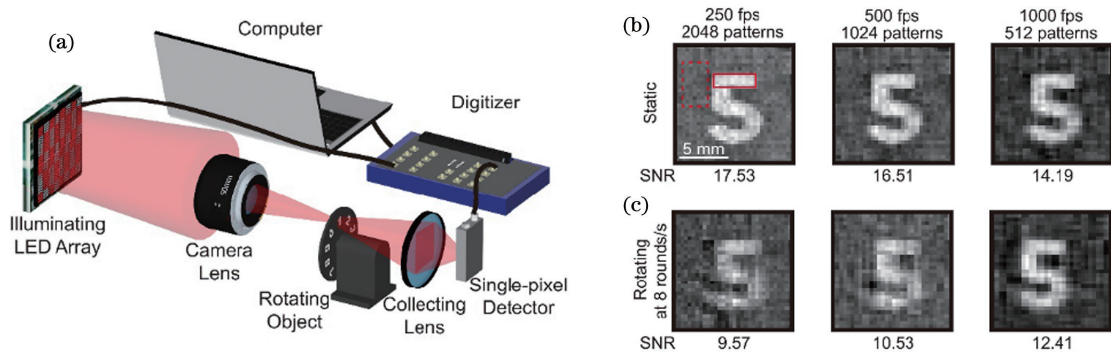


图 2 1000 frame/s 的计算关联成像实验装置和结果^[74]。(a)成像系统示意图;(b)静止物体成像结果;(c)旋转物体成像结果

Fig. 2 Experimental setup and results of 1000 frame/s computational ghost imaging^[74]. (a) Diagram of imaging system; (b) imaging results of static object; (c) imaging results of rotating object

东京大学的 Kohno 等^[79]制备了一维的硅基膜热光芯片。入射光被片上 128 路波导分束,每个波导的光程由电信号控制。经调制后的 128 路光经自由传播后通过干涉形成 1 维膜热光场。该光源的调制速率可达 100 MHz,他们基于该光源对 2 维物体进行了推扫关联成像。次年,该课题组还将 128 路波导输出的光耦合到多模光纤中,制备出了片上控制的二维膜热光源,并完成了实验^[80],实验

装置如图 3 所示。此外,大阪府立大学还提出将窄带激光直接耦合进多模光纤,通过多模光纤调制光场,制备高速刷新的膜热光源^[81]。近年来,本课题组自主研制了大功率、刷新频率可达几十 kHz 的高性能膜热光源,对 km 级距离的目标实现了准实时成像。现今,制备高性能的膜热光源依然是关联成像研究领域的热点,备受国内外关注。

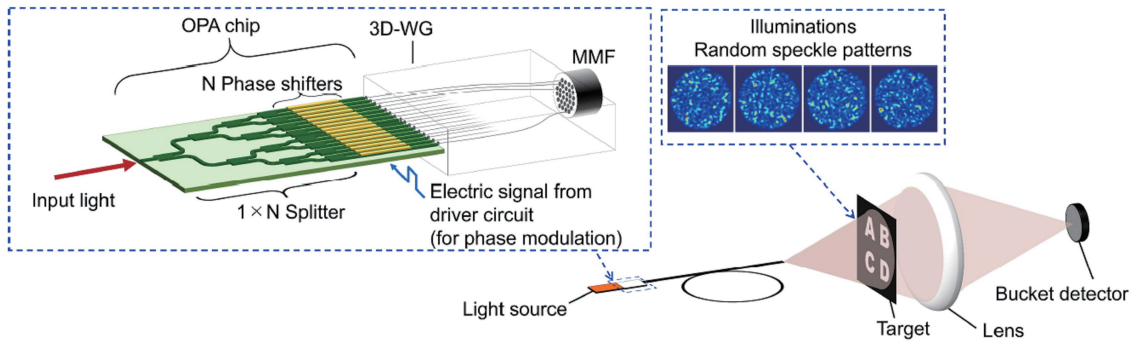


图 3 硅基芯片耦合多模光纤的二维膜热光源及成像装置示意图^[80]

Fig. 3 Two-dimensional pseudo-thermal source using multimode fiber coupled with silicon chip and diagram of imaging setup^[80]

3.1.2 改进成像策略

在关联成像中,通过设计光源调制方式,可以灵活地获取、处理图像信息。例如,通过控制照明散斑的横向相干长度,可以实时调整成像分辨率^[82]。使用超瑞利分布的照明光场可以提高成像对比度^[83]。对于运动物体关联成像,则可以通过改进成像策略提升信息获取效率,并提高成像速度。改进成像策略包括设计照明光场强度分布和改进图像信息获取策略。2013 年,中国科学院上海光学精密机械研究所提出了用大小散斑混合的光场照明物体,大小散斑混合的成像信噪比在相同采样次数下比单一的小散斑成像信噪比高,比大散斑成像分辨率高,从而减

少了成像所需的采样次数^[72]。2017 年,格拉斯哥大学研究小组从仿生学角度出发,根据人眼成像中视场中心分辨率高、边缘区域分辨率低的特点,设计了相应分辨率的结构光场^[84],如图 4 所示。该方法降低了视场边缘的分辨率,也提升了关联成像速度。另一方面,绝大部分自然图像是低频信息,高频信息的占比很小,直接用高分辨率的散斑成像容易造成信息冗余。

针对这一问题,研究人员提出了自适应压缩感知关联成像方案。他们根据 Haar 小波基设计测量光场,先获取图像的低频信息,并判断高频信息所在的区域,然后通过提高光场分辨率来获取该区域的

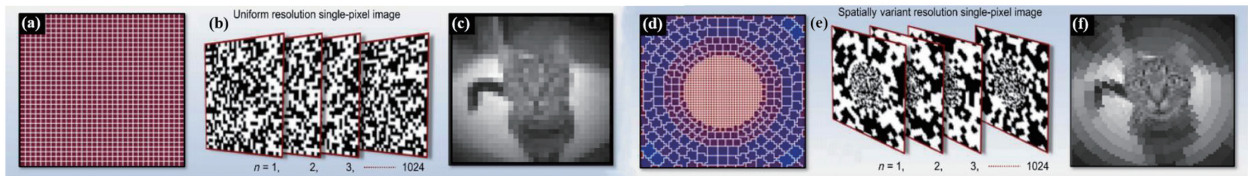


图 4 视网膜凹式散斑成像^[84]。(a)分辨率均匀的视场;(b)分辨率均匀的照明散斑;(c)分辨率均匀的重构图像;(d)视网膜凹式视场;(e)视网膜凹式照明散斑;(f)用视网膜凹式散斑重构的图像

Fig. 4 Retinal concave speckleimaging^[84]. (a) Field of view with constant resolution; (b) illumination patterns with constant resolution; (c) reconstructed image with constant resolution; (d) retinal concave field of view; (e) retinal concave illumination speckles; (f) reconstructed image from retinal concave speckles

高频信息,经不断迭代,最终以小于 0.3 的采样率完成了图像重建^[85-86],该方法也可用于对运动物体的成像。2016 年,本课题组在此基础上提出了多尺度的自适应计算关联成像,先用低分辨率的光场重构物体图像,然后根据成像需求调整照明光场的视场和分辨率,进而逐渐获得目标的高分辨率图像,如图 5 所示。和采用传统的方法相比,采用本课题组所提方案进行成像时所需的数据量减少了一个量级,数据处理时间缩短了一个量级,从而提升了关联成像速度^[82]。此外,所提方案获取图像的边缘信息,其比直接获取图像全部信息的方案所需的采样次数少,同时又可以获取物体的位置信息。2021 年,本课题组实现了针对边缘搜索的反馈关联成像,进一步减少了成像所需的采样次数^[87]。近年来,随着光电技术的发展以及计算机运算能力的提升,高性能的光场调制器件、信号采集设备和数据处理组件层出不穷。如何根据实际应用场景优化照明光场、设计成像策略,是关联成像中非常值得研究的问题。

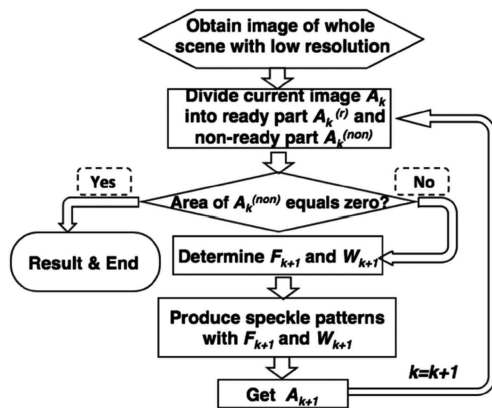


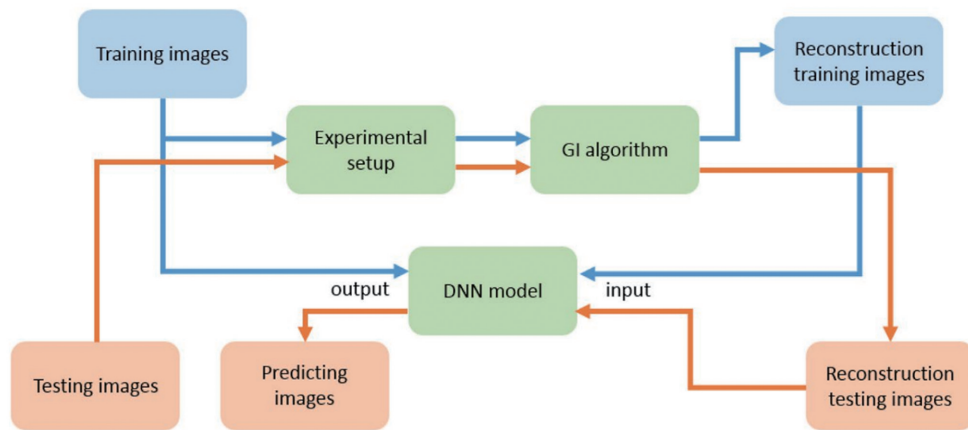
图 5 多分辨率尺度自适应关联成像流程图^[82]

Fig. 5 Flowchart of multi-resolution scale adaptive correlated imaging^[82]

3.1.3 开发实时的先进算法

作为一种间接成像方式,关联成像所采用的图

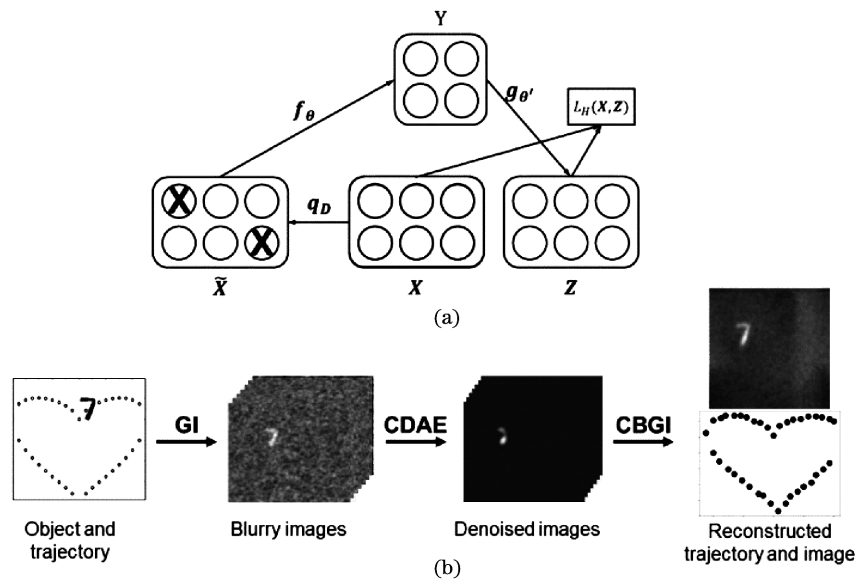
像重构算法对系统性能有重要影响。开发先进的成像算法可以大幅减少成像所需的采样次数,从而显著提升算法对运动物体的成像性能。关联成像的重构算法可以分为两类。一类是线性算法,包括归一关联^[88]、迭代关联^[89]、差分关联^[90]和二阶归一关联^[91]。这类算法在传统的强度关联算法的基础上进行了优化,相比传统算法可以减少成像所需采样次数;这类算法的核心依然是强度关联,需要满足采样甚至过采样的条件以重构图像;此外,该类算法都是线性算法,在普通计算机的运算环境下,数据处理时间几乎可以忽略不计,这有助于实现实时成像。2020 年,清华大学研究小组基于强度关联算法开发出了实时成像系统^[92]。第二类是凸优化算法^[25-29,93]。在关联成像中,每一帧照明光场可以看作是一个行向量,成像所用的多帧照明光场可以组成测量矩阵,桶探测信号可以看作成像系统在该测量矩阵下的测量结果,此时可以通过矩阵优化求解类的方法重建图像。这类算法的典型代表是压缩感知。诸多工作已证明,将压缩感知应用到关联成像可以大大减少成像所需测量次数并有效减小噪声的影响。在成像过程中,可以根据物体的特性采用不同的稀疏基进行重构,从而进一步提升关联成像的性能。然而,压缩感知的运算量较大,且随着测量矩阵维度的扩大,其运算量会呈指数函数上升,因此在需要实时成像的场景中,压缩感知往往受到限制。近年来,人工智能的蓬勃发展为光学成像带来了新机遇。研究人员将人工智能技术应用于关联成像,大幅减少了成像所需采样次数,为进一步提升成像速度提供了新的可能。2017 年,中国科学院上海光学精密机械研究所司徒国海研究小组实现了基于机器学习的关联成像,其成像流程如图 6 所示。首先通过关联成像在小采样下重构出模糊图像,然后利用已训练的神经网络对模糊图像进行降噪,最终实现了采样率小于 1% 的图像重构^[30]。同年,西安交通大学研究小

图 6 基于深度学习的关联成像流程图^[30]Fig. 6 Flowchart of ghost imaging using deep learning^[30]

组也利用深度学习技术减少了关联成像所需采样次数^[31]。

在利用机器学习实现运动物体关联成像方面,本课题组也进行了探讨和研究^[94]。在物体运动过程中,通过少量采样可以得到物体模糊的图像,然后利用卷积降噪自编码(CDAE)的方法提升模糊图像信噪比、增强图像,通过互关联的方法可以获取运动物体不同时刻的位置,将位置信息用于图像重构,

最终实现了对运动物体的追踪和成像。所使用的CDAE原理如图7(a)所示, \tilde{X} 表示退化的数据,对应小采样获得的低信噪比图像, X 表示真值,对应训练集中的图像。在数据训练阶段,通过加噪声等方法使 X 退化,得到 \tilde{X} 。 Y 表示卷积网络, Z 表示输出结果,对应重构的图像。CDAE方法通过优化使 X 和 Z 的误差 $L_H(X, Z)$ 最小,最终实现图像降噪。图7(b)为运动物体关联成像结果。

图 7 CDAE 示意图和基于机器学习的运动物体关联成像结果^[94]。(a) CDAE 示意图;(b)运动物体关联成像结果Fig. 7 Schematic diagram of CDAE and correlated imaging results of moving object obtained based on machine learning^[94].

(a) Schematic diagram of CDAE; (b) results of correlated imaging for moving object

强度关联、压缩感知和机器学习三类图像重构算法各有所长,可根据实际场景所需择优使用。表 1 是强度关联、压缩感知、机器学习三类方法在所需采样次数、成像质量、鲁棒性和实时性方面的比较。表格中星号越多,表示该算法在该参数下的性

能越高。先进的重构算法可以减少采样次数、缩短采样时间。但对于运动物体的成像,为了抑制运动模糊,需在缩短采样时间的同时缩短运算时间,以尽可能地实时重构图像,这对遥感、无人驾驶中实时根据图像判断场景信息有重要意义。可用于运动物体

表 1 三类算法的性能比较(星号越多表示在该指标下性能越好)

Table 1 Comparison of three algorithms (more stars mean higher performance under this index)

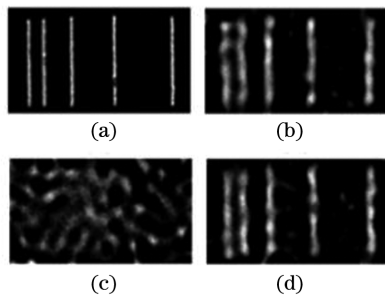
Algorithm	Number of samplings required	Quality of reconstructed image	Robustness	Timeliness
Intensity correlation	★	★	★★★	★★★
Compressive sensing	★★	★★	★	★
Machine learning	★★★	★★★	★★	★★

关联成像的算法应当同时具备大幅减少成像所需采样次数和实时处理数据的特点。因此,开发实时的高性能算法依然是关联成像的研究热点之一。

通过提升成像速度来对运动物体进行成像的方法的适用范围广。对于变速运动的目标、多目标运动的场景,以及物体发生形变等场景,该方法可以通过实时图像获取目标信息。另一方面,该类方法中,物体运动速度和系统参数的关系受(11)式的限制。当物体运动过快、场景变化过快、物体面积较大时,成像所需的采样次数较多,这时成像过程对成像系统的采样频率要求很高。

3.2 基于先验信息的运动物体成像

运动物体的速度^[95-97]、位置^[98-100]和稀疏



性^[101-102]等可作为先验信息用于物体图像重构。此外,物体在空间域的平移在频谱域上表现为相位变化^[103-106]。关联成像灵活的信息提取机制决定了其可以利用这些先验信息来提升关联成像对运动物体成像的能力。

3.2.1 基于速度先验的成像方法

2014年,中国科学院上海光学精密机械研究所Li等^[95]提出了对以未知速度匀速运动的物体进行成像的方法,相关结果如图8所示。实验中,物体以未知的速度 v_0 沿光场切向匀速运动。图像重构算法对参考臂光场按照不同的速度 v 进行平移补偿,补偿速度越接近物体的运动速度,则成像分辨率越高,据此可以得到物体的速度以及运动物体的图像。

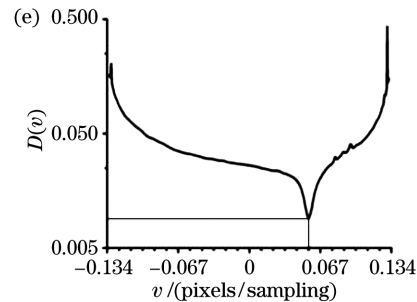


图 8 速度未知的匀速运动物体的关联成像结果^[95]。(a)物体;(b)静止物体的成像结果;(c)物体运动速度为 0.056 pixel/s 时算法未补偿速度的结果;(d)补偿速度为 0.056 pixel/s 时的成像结果;(e)不同补偿速度下重构图像的均方误差(MSE)

Fig. 8 Correlated imaging results for moving object with unknown constant speed^[95]. (a) Object; (b) imaging result of stationary object; (c) result of algorithm without compensating speed when object moves at speed of 0.056 pixel/s; (d) imaging result when compensation speed is 0.056 pixel/s; (e) MSE of reconstructed images for different compensation speed

次年,该研究小组还对物体沿光场传播方向匀速运动的情况进行了讨论。当热光场传播到远场后,光场的强度分布将不随传播距离的增加而变化,而散斑尺寸将随着传播距离的增加而扩大。此时在远场沿轴向匀速运动的物体的图像将由于不同尺寸散斑的关联而产生模糊。通过对散斑的尺寸进行相应的修正,可以获得不同信噪比的图像。根据分辨率和信噪比最高的图像所对应的散斑尺寸,可以估计物体的运动速度^[96]。

该方法不需要在物体准静止状态下获得物体的

图像,大大降低了对成像系统采集频率的要求。另一方面,该方法对匀速运动物体有效,且需要已知物体的速度方向。

3.2.2 基于位置先验的成像方法

在一些场景中,当物体平动或转动时,短时间内物体形状不发生变化。此时,通过获得物体的位置信息并对物体进行追踪,可以在物体运动过程中逐渐获得清晰的物体图像。物体的位置信息量远比图像信息量少,因此人们可以更快、更容易地获得物体的位置信息。与实时获得物体的图像相比,以物体

位置为先验信息对物体进行追踪成像是一种更高效的信息获取方式。利用这一特点,本课题组提出了基于时域互相关的关联成像方法,该方法在不同时刻通过少量采样获得物体模糊的图像,通过计算图像的互相关可以得到对应时刻物体的位移,通过将位移用于图像重构,可以在物体运动过程中逐渐获得物体的清晰图像,结果如图 9 所示。该方法对旋转运动的物体同样有效^[98]。

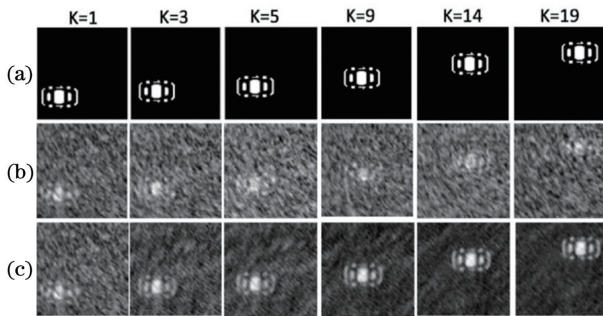


图 9 基于时域相关对运动物体进行关联成像的结果^[98]。
(a)不同位置的物体;(b)传统关联成像的结果;
(c)基于时域相关的关联成像结果

Fig. 9 Results of correlated imaging for moving object based on temporal correlation^[98]. (a) Objects at different positions; (b) results of conventional correlated imaging; (c) correlated imaging results based on temporal correlation

3.2.3 基于稀疏性先验的成像方法

在一些场景中,运动物体和整个场景相比,常常具有空间稀疏性,如马路上的行人、行驶的汽车和周围的街区、高楼相比,散射界面小、具有空间稀疏性。对于这样的场景,本课题组提出了时域差分关联的成像方法。通过在不同时刻用相同的散斑序列照明场景,将对应的桶探测信号作差,使该差值和照明光场相关联,从而得到运动物体的图像,该方法舍弃了背景信息。和直接对整个场景成像的方法相比,因被成像对象所占像素数的减少,该方法所需采样次数大幅减少,进而使得其对运动物体的成像性能得到提升^[101]。该方法也适用于多物体、变速运动的情况,可用于安全监控、区域侦查等场景,这些应用中,相对于不变的背景信息,人们更关心监控或侦查区域的变化信息。

3.2.4 无图像的目标分类或追踪方法

在关联成像中,当物体在静止的散斑中运动时,桶探测器也会收集到时域上有强度涨落的信号,且信号的涨落和物体的空间信息有关。基于这一现象,日本科学家将关联成像的方法用于血细胞计数

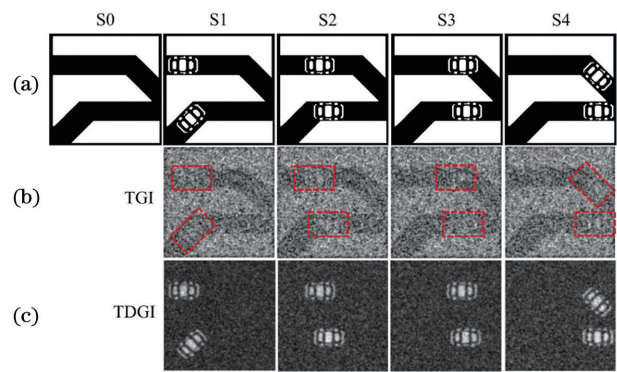


图 10 时域差分关联成像结果^[101]。(a)S0 时刻的背景, S1~S4 时刻的物体;(b)传统方法对 S1~S4 时刻物体的成像结果;(c)时域差分关联方法获得的运动物体在 S1~S4 时刻的图像

Fig. 10 Imaging results of temporal differential correlated imaging^[101]. (a) Background at time of S0, and objects at different time S1-S4; (b) imaging results of object at S1-S4 time obtained by conventional correlated imaging method; (c) images of moving object at S1-S4 time acquired by temporal differential correlated imaging method

技术,结合压缩感知和机器学习,实现了大通量的血细胞分类和计数,该技术被命名为 ghost cytometry (原理如图 11 所示),相关研究发表于 *Science* 期刊^[102]。另外,物体在空间域中的平动,在频谱域表现为相位的变化。根据这一特点,Zhang 等^[105-106]用傅里叶结构光场照明物体,通过桶探测的方式获取物体函数在傅里叶基下的系数,根据物体频谱的变

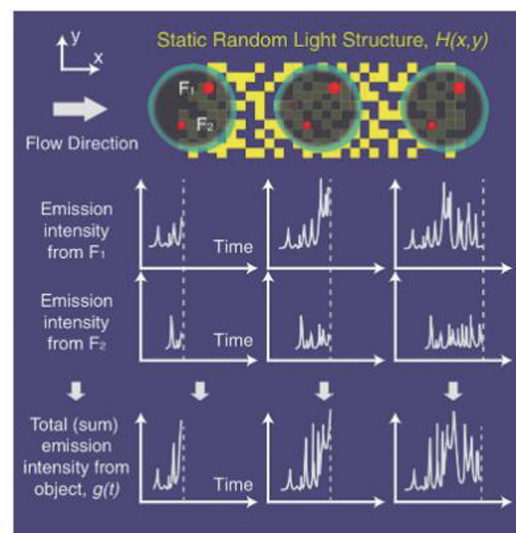


图 11 Ghost cytometry 计数原理示意图^[102]

Fig. 11 Diagram of counting principle of ghost cytometry^[102]

化判断物体的位置,进而实现了对运动物体的无图像追踪。

关联成像和传统成像的机制不同,通过设计照明方式可以使成像系统输出的信息更加多样。如何根据场景需求在成像过程中优化信息提取过程,进而开发先进的运动物体成像方案,是非常值得研究的问题。

4 运动物体成像的发展趋势

关联成像技术朝着更高分辨率、更大工作距离、更大视场、更强鲁棒性的方向不断发展。针对运动物体,成像系统需以更高的信息利用效率更快地获取目标信息。具体到科学技术问题,包括以下 3 个方面。

4.1 制备更高性能的光源

现今,100 万像素级且刷新频率为 10 kHz 量级的赝热光源已有商用化产品。100 像素量级的光源的刷新频率已可高达 100 MHz 量级,但其平均功率均在 10 mW 量级。为了进一步提升关联成像的探测能力、拓展关联成像的应用场景,研制同时具备更高刷新频率、更高能量、更高空间分辨率的赝热光源是一个亟待突破的关键技术,这对关联成像进一步走向应用有重要意义。

4.2 开发更先进的实时算法

算法性能对关联成像的鲁棒性和信息获取效率有重要影响。为将关联成像拓展到对更快速运动物体的捕获或对更快过程的探测,需要进一步提升成像的空间分辨率和时间分辨率,这时除了需要提升成像系统的性能,也需要更先进算法的开发。对运动物体的成像需要兼顾算法的时效性。先进的实时成像算法是一个极富挑战性的数理问题,也是关联成像的研究热点。

4.3 研制更灵敏的探测器

现今,远距离、大视场、高分辨率是成像技术发展的趋势。研究弱光条件下的成像对扩大探测距离、增大成像视场有重要意义。在弱光条件下,经目标反射到达探测器表面的光子通量低,这时需要更灵敏的探测器。另外,在对运动物体的成像中,需要探测器在短时间内获得物体或场景的信息。低光通量、短时间探测使得探测器捕获的光子数极为有限,探测信号的信噪比极低。如何在信噪比极低的信号中获取物体或场景的信息是一个开放性的难题,仍需要进一步的深入研究。

5 结束语

对运动物体的成像是拓展关联成像应用、提升关联成像性能需要解决的关键问题之一,对运动物体的成像研究涉及原理机制、方案方法等理论研究,也需要应用技术研究的推进。运动物体成像要求系统具备高时间分辨率。由于成像机制不同,关联成像时间分辨率的提升方法和传统成像有类似之处,但也带来新的挑战,是一个值得深入研究的问题。另一方面,在光源功率一定的条件下,短时间内物体回波信号中的光子数有限,此时成像系统的时间分辨率和回波信噪比相互制约。这种制约是由光子数有限导致的,很难通过提升探测器的响应速率来解决,此时需要提升成像系统的信息获取效率来寻求解决方案。关联成像的信息获取方式灵活、探测灵敏度高,为弱光条件下运动物体的成像提供了可能,也给远距离、大视场、弱回波场景中的运动物体成像带来了新的机遇。

参 考 文 献

- [1] Li C Z, Huang M Q, Chen P X, et al. Quantum communication and quantum computation[M]. Changsha: National University of Defense Technology Express, 2000.
李承祖, 黄明球, 陈平形, 等. 量子通信与量子计算[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2000.
- [2] Klyshko D N. Photon and nonlinear optics[M]. New York: Gordon and Breach Science Press, 1988.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Deng C J, Gong W L, Han S S. Pulse-compression ghost imaging lidar via coherent detection[J]. Optics Express, 2016, 24(23): 25983-25994.
- [6] Deng C J, Pan L, Wang C L, et al. Performance analysis of ghost imaging lidar in background light environment[J]. Photonics Research, 2017, 5(5): 431-435.
- [7] Pan L, Deng C J, Bo Z W, et al. Experimental investigation of chirped amplitude modulation heterodyne ghost imaging[J]. Optics Express, 2020, 28(14): 20808-20816.
- [8] Wu Y B, Yang Z H, Tang Z L. Experimental study

- on anti-disturbance ability of underwater ghost imaging [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(6): 0611002.
- 吴泳波, 杨志慧, 唐志列. 水下鬼成像抗扰动能力的实验研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(6): 0611002.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Liu X L, Shi J H, Wu X Y, et al. Fast first-photon ghost imaging[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 5012.
- [12] Liu X L, Shi J H, Sun L, et al. Photon-limited single-pixel imaging [J]. *Optics Express*, 2020, 28(6): 8132-8144.
- [13] Zhu Y, Shi J H, Wu X Y, et al. Photon-limited non-imaging object detection and classification based on single-pixel imaging system[J]. *Applied Physics B*, 2020, 126: 21.
- [14] Cheng J, Han S S. Incoherent coincidence imaging and its applicability in X-ray diffraction[J]. *Physical Review Letters*, 2004, 92(9): 093903.
- [15] 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.
- [16] Pelliccia D, Rack A, Scheel M, et al. Experimental X-ray ghost imaging [J]. *Physical Review Letters*, 2016, 117(11): 113902.
- [17] Schori A, Shwartz S. X-ray ghost imaging with a laboratory source [J]. *Optics Express*, 2017, 25(13): 14822-14828.
- [18] Zhang A X, He Y H, Wu L G, et al. Tabletop X-ray ghost imaging with ultra-low radiation[J]. *Optica*, 2018, 5(4): 374-377.
- [19] Yang S C, Yu H, Lu R H, et al. Simulation of Fourier-transform ghost imaging using polychromatic X-ray sources[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(5): 0511003.
- 杨善初, 喻虹, 陆荣华, 等. 非单色 X 光傅里叶变换鬼成像模拟[J]. *光学学报*, 2019, 39(5): 0511003.
- [20] Radwell N, Mitchell K J, Gibson G M, et al. Single-pixel infrared and visible microscope [J]. *Optica*, 2014, 1(5): 285-289.
- [21] Edgar M P, Gibson G M, Padgett M J. Principles and prospects for single-pixel imaging [J]. *Nature Photonics*, 2019, 13(1): 13-20.
- [22] Shrekenhamer D, Watts C M, Padilla W J. Terahertz single pixel imaging with an optically controlled dynamic spatial light modulator[J]. *Optics Express*, 2013, 21(10): 12507-12518.
- [23] 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.
- [24] Zhao J P, Yiwen E, Williams K, et al. Spatial sampling of terahertz fields with sub-wavelength accuracy via probe-beam encoding[J]. *Light: Science & Applications*, 2019, 8: 55.
- [25] Katz O, Bromberg Y, Silberberg Y. Compressive ghost imaging [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95(13): 131110.
- [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] Huang H, Zhou C, Tian T, et al. High-quality compressive ghost imaging[J]. *Optics Communications*, 2018, 412: 60-65.
- [28] Kang Y, Yao Y P, Kang Z H, et al. Performance analysis of compressive ghost imaging based on different signal reconstruction techniques[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2015, 32(6): 1063-1067.
- [29] Shi X H, Huang X W, Nan S Q, et al. Image quality enhancement in low-light-level ghost imaging using modified compressive sensing method [J]. *Laser Physics Letters*, 2018, 15(4): 045204.
- [30] Lyu M, Wang W, Wang H, et al. Deep-learning-based ghost imaging [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 17865.
- [31] He Y C, Wang G, Dong G X, et al. Ghost imaging based on deep learning[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 6469.
- [32] Wang F, Wang H, Wang H C, et al. Learning from simulation: an end-to-end deep-learning approach for computational ghost imaging [J]. *Optics Express*, 2019, 27(18): 25560-25572.
- [33] Rizvi S, Cao J, Zhang K Y, et al. DeepGhost: real-time computational ghost imaging via deep learning [J]. *Scientific Reports*, 2020, 10: 11400.
- [34] 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.
- [35] Pan Z L, Zhang L H. Optical cryptography-based temporal ghost imaging with chaotic laser[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(16): 1289-1292.

- [36] Han S S, Yu H, Shen X, et al. A review of ghost imaging via sparsity constraints[J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(8): 1379.
- [37] Ma S, Liu Z T, Wang C L, et al. Ghost imaging LiDAR via sparsity constraints using push-broom scanning[J]. *Optics Express*, 2019, 27(9): 13219-13228.
- [38] Ma S, Hu C Y, Wang C L, et al. Multi-scale ghost imaging LiDAR via sparsity constraints using push-broom scanning[J]. *Optics Communications*, 2019, 448: 89-92.
- [39] Clemente P, Durán V, Torres-Company V, et al. Optical encryption based on computational ghost imaging[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(14): 2391-2393.
- [40] Tanha M, Kheradmand R, Ahmadi-Kandjani S. Gray-scale and color optical encryption based on computational ghost imaging [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(10): 101108.
- [41] Zhao S M, Wang L, Liang W Q, et al. High performance optical encryption based on computational ghost imaging with QR code and compressive sensing technique[J]. *Optics Communications*, 2015, 353: 90-95.
- [42] Fuller P W W. An introduction to high speed photography and photonics[J]. *The Imaging Science Journal*, 2009, 57(6): 293-302.
- [43] 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.
- [44] Valencia A, Scarcelli G, D'Angelo M, et al. Two-photon imaging with thermal light [J]. *Physical Review Letters*, 2005, 94(6): 063601.
- [45] 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.
- [46] Wu Z W, Qiu X D, Chen L X. Current status and prospect for correlated imaging technique[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(6): 060001.
吴自文, 邱晓东, 陈理想. 关联成像技术研究现状及展望 [J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(6): 060001.
- [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] Shapiro J H. Computational ghost imaging [J]. *Physical Review A*, 2008, 78(6): 061802.
- [49] 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.
- [50] Liu X F, Chen X H, Yao X R, et al. Lensless ghost imaging with sunlight [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(8): 2314-2317.
- [51] Gong W L, Zhao C Q, Yu H, et al. Three-dimensional ghost imaging lidar via sparsity constraint[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 26133.
- [52] Gong W L, Han S S. Correlated imaging in scattering media[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(3): 394-396.
- [53] Garrison J, Chiao R. *Quantum optics*[M]. Oxford: Oxford University Press, 2008.
- [54] Padgett M J, Boyd R W. An introduction to ghost imaging: quantum and classical [J]. *Philosophical Transactions. Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences*, 2017, 375(2099): 20160233.
- [55] Cao D Z, Xiong J, Wang K G. Geometrical optics in correlated imaging systems [J]. *Physical Review A*, 2005, 71: 013801.
- [56] Shih Y. *The physics of ghost imaging [M] // Classical, Semi-classical and Quantum Noise*. New York: Springer, 2011: 169-222.
- [57] Shih Y. The physics of ghost imaging: nonlocal interference or local intensity fluctuation correlation? [J]. *Quantum Information Processing*, 2012, 11(4): 995-1001.
- [58] Shapiro J H, Boyd R W. The physics of ghost imaging [J]. *Quantum Information Processing*, 2012, 11(4): 949-993.
- [59] 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.
- [60] Scully M O, Zubairy M S. *Quantum optics* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- [61] Khamoushi S M, Nosrati Y, Tavassoli S H. Sinusoidal ghost imaging [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(15): 3452-3455.
- [62] Zhang Z B, Wang X Y, Zheng G A, et al. Hadamard single-pixel imaging versus Fourier single-pixel imaging [J]. *Optics Express*, 2017, 25(16): 19619-19639.
- [63] El-Desouki M, Deen M J, Fang Q Y, et al. CMOS image sensors for high speed applications [J]. *Sensors*, 2009, 9(1): 430-444.
- [64] Li Z Y, Zgadzaj R, Wang X M, et al. Single-shot tomographic movies of evolving light-velocity objects [J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 3085.
- [65] Suzuki T, Isa F, Fujii L, et al. Sequentially timed all-optical mapping photography (STAMP) utilizing spectral filtering [J]. *Optics Express*, 2015, 23(23):

- 30512-30522.
- [66] Gao L, Liang J Y, Li C Y, et al. Single-shot compressed ultrafast photography at one hundred billion frames per second [J]. *Nature*, 2014, 516 (7529): 74-77.
- [67] Li H, Xiong J, Zeng G H. Lensless ghost imaging for moving objects [J]. *Optical Engineering*, 2011, 50(12): 127005.
- [68] Gong W L, Han S S. The influence of axial correlation depth of light field on lensless ghost imaging [J]. *The Journal of the Optical Society of America B*, 2010, 27(4): 675-678.
- [69] Zhang C, Gong W L, Han S S. Ghost imaging for moving targets and its application in remote sensing [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39 (12): 1214003.
张聪, 龚文林, 韩申生. 运动目标强度关联成像及其在遥感探测中的应用 [J]. *中国激光*, 2012, 39(12): 1214003.
- [70] Li Q, Duan Z T, Lin H Z, et al. Coprime-frequencied sinusoidal modulation for improving the speed of computational ghost imaging with a spatial light modulator [J]. *Chinese Optics Letters*, 2016, 14(11): 111103.
- [71] Welsh S S, Edgar M P, Jonathan P, et al. Multi-wavelength compressive computational ghost imaging [J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8618: 86180I.
- [72] Chen M, Li E, Han S. Application of multi-correlation-scale measurement matrices in ghost imaging via sparsity constraints [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(13): 2924-2928.
- [73] Jiang W J, Li X Y, Peng X L, et al. Imaging high-speed moving targets with a single-pixel detector [J]. *Optics Express*, 2020, 28(6): 7889-7897.
- [74] Xu Z H, Chen W, Penuelas J, et al. 1000 fps computational ghost imaging using LED-based structured illumination [J]. *Optics Express*, 2018, 26 (3): 2427-2434.
- [75] Salvador-Balaguer E, Latorre-Carmona P, Chabert C, et al. Low-cost single-pixel 3D imaging by using an LED array [J]. *Optics Express*, 2018, 26(12): 15623-15631.
- [76] Zhao W G, Chen H, Yuan Y, et al. Ultrahigh-speed color imaging with single-pixel detectors at low light level [J]. *Physical Review Applied*, 2019, 12 (3): 034049.
- [77] Sayyah K, Efimov O, Patterson P, et al. Two-dimensional pseudo-random optical phased array based on tandem optical injection locking of vertical cavity surface emitting lasers [J]. *Optics Express*, 2015, 23(15): 19405-19416.
- [78] Nitta K, Yano Y, Kitada C, et al. Fast computational ghost imaging with laser array modulation [J]. *Applied Sciences*, 2019, 9 (22): 4807.
- [79] Kohno Y, Komatsu K, Tang R, et al. Ghost imaging using a large-scale silicon photonic phased array chip [J]. *Optics Express*, 2019, 27(3): 3817-3823.
- [80] Fukui T, Kohno Y, Tang R, et al. Single-pixel imaging through multimode fiber using silicon optical phased array chip [C] // *Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2020, San Diego, California. Washington, D.C.: OSA, 2020: 1.*
- [81] Kameyama Y, Ikeda K, Koyama O, et al. Single-pixel Imaging using a Multi-core Fiber [C] // *2019 24th OptoElectronics and Communications Conference (OECC) and 2019 International Conference on Photonics in Switching and Computing (PSC), July 7-11, 2019. Fukuoka, Japan. New York: IEEE Press, 2019: 1-3.*
- [82] Sun S, Liu W T, Lin H Z, et al. Multi-scale adaptive computational ghost imaging [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 37013.
- [83] Chan K W C, O'Sullivan M N, Boyd R W. High-order thermal ghost imaging [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(21): 3343-3345.
- [84] 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.
- [85] Aßmann M, Bayer M. Compressive adaptive computational ghost imaging [J]. *Scientific Reports*, 2013, 3: 1545.
- [86] 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.
- [87] Gu J H, Sun S, Xu Y K, et al. Feedback ghost imaging by gradually distinguishing and concentrating onto the edge area [J]. *Chinese Optics Letters*, 2021, 19(4): 041102.
- [88] Sun B Q, Welsh S S, Edgar M P, et al. Normalized ghost imaging [J]. *Optics Express*, 2012, 20(15): 16892-16901.
- [89] Yao X R, Yu W K, Liu X F, et al. Iterative denoising of ghost imaging [J]. *Optics Express*, 2014, 22(20): 24268-24275.
- [90] Ferri F, Magatti D, Lugiato L A, et al. Differential ghost imaging [J]. *Physical Review Letters*, 2010, 104(25): 253603.
- [91] 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.
- [92] Yang Z, Liu J, Zhang W X, et al. Instant single-pixel imaging: on-chip real-time implementation based on the instant ghost imaging algorithm [J]. *OSA Continuum*, 2020, 3(3): 629-636.
- [93] Zhang C, Guo S X, Cao J S, et al. Object reconstitution using pseudo-inverse for ghost imaging[J]. *Optics Express*, 2014, 22(24): 30063-30073.
- [94] Hu H K, Sun S, Lin H Z, et al. Denoising ghost imaging under a small sampling rate via deep learning for tracking and imaging moving objects[J]. *Optics Express*, 2020, 28(25): 37284-37293.
- [95] Li E R, Bo Z W, Chen M L, et al. Ghost imaging of a moving target with an unknown constant speed[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(25): 251120.
- [96] 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.
- [97] Jiao S M, Sun M J, Gao Y, et al. Motion estimation and quality enhancement for a single image in dynamic single-pixel imaging [J]. *Optics Express*, 2019, 27(9): 12841-12854.
- [98] Sun S, Gu J H, Lin H Z, et al. Gradual ghost imaging of moving objects by tracking based on cross correlation[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(22): 5594-5597.
- [99] 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.
- [100] Zhang Z B, Li X, Zheng S J, et al. Image-free classification of fast-moving objects using “learned” structured illumination and single-pixel detection[J]. *Optics Express*, 2020, 28(9): 13269-13278.
- [101] Sun S, Lin H Z, Xu Y K, et al. Tracking and imaging of moving objects with temporal intensity difference correlation[J]. *Optics Express*, 2019, 27(20): 27851-27861.
- [102] Ota S, Horisaki R, Kawamura Y, et al. Ghost cytometry[J]. *Science*, 2018, 360(6394): 1246-1251.
- [103] Zhang C, Gong W L, Han S S. Improving imaging resolution of shaking targets by Fourier-transform ghost diffraction[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(2): 021111.
- [104] Bo Z W, Gong W L, Han S S. Motion de-blurring by second-order intensity-correlated imaging[J]. *Chinese Optics Letters*, 2016, 14(7): 070301.
- [105] Zhang Z B, Ye J Q, Deng Q W, et al. Image-free real-time detection and tracking of fast moving object using a single-pixel detector [J]. *Optics Express*, 2019, 27(24): 35394-35401.
- [106] Deng Q W, Zhang Z B, Zhong J G. Image-free real-time 3-D tracking of a fast-moving object using dual-pixel detection[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(17): 4734-4737.