

单像素成像信噪比分析及其在特殊波段的发展

赵海潇, 郭岩, 李珮明, 陈炳霖, 孙宝清*

山东大学信息科学与工程学院, 山东 青岛 266237

摘要 不同于传统的像素阵列化相机, 单像素成像, 作为一种新型的计算成像技术, 通过使用不具有空间分辨能力的桶探测器, 探测出被目标物体反射或透射的光强度, 并将该强度与经过掩模图案调制的具有特定空间分布的结构光强度作关联运算, 最终重构出清晰的物体图像。相比多像素化相机, 单像素成像具有成本廉价、可在特殊波段成像等优点, 在科研界引起了广泛的关注。本文分析了不同采样方式下单像素成像的信噪比大小, 阐述了单像素成像在特殊波段成像以及原子、中子成像的实验研究。最后针对单像素成像在成像时间上的劣势, 讨论了超快成像, 超快成像有望克服成像时间长的难题。

关键词 成像系统; 单像素成像; 特殊波段成像; 信噪比; 超快成像

中图分类号 O438

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1011010

Investigation of Single-Pixel Imaging in Signal-to-Noise Ratio and Its Development at Special Wavelength

Zhao Haixiao, Guo Yan, Li Peiming, Chen Binglin, Sun Baoqing*

School of Information Science and Engineering, Shandong University, Qingdao, Shandong 266237, China

Abstract Different from traditional pixel array cameras, single-pixel imaging, as a new type of computational imaging technology, uses bucket detector without spatial resolution to detect light intensity reflected or transmitted by the target object, this intensity is calculated correlatively to the structured light intensity with specific spatial distribution modulated by mask patterns, and finally a clear object image is reconstructed. Single-pixel imaging has attracted widespread attention in scientific research circles because of its low cost and the ability to image in special wavebands. This article mainly discusses the signal-to-noise ratio of single-pixel imaging in different sampling methods, and describes imaging in special wavebands and experimental research of atomic and neutron imaging. Finally, in view of the disadvantages of single-pixel imaging in imaging time, ultra-fast imaging is discussed and expected to overcome the problem of long imaging time.

Key words imaging system; single-pixel imaging; special wavebands imaging; signal-to-noise ratio; ultra-fast imaging

OCIS codes 110.2970; 110.3010

1 引言

图像是视觉效果的基础, 是对大自然中事物的客观反映, 是人类认识世界、传递信息的重要工具,

而获取图像最主要的方法之一就是成像。目前传统的成像过程是采用多像素化相机, 利用高斯成像公式, 将目标场景映射到感光元器件阵列上, 而在感光元器件阵列上的空间强度分布就是我们所要得到的

收稿日期: 2021-02-07; 修回日期: 2021-03-14; 录用日期: 2021-03-19

基金项目: 国家自然科学基金(61675117)、山东省重点研发计划公益类(2019GGX104002)、山东省联合基金(ZR2019LLZ003-1)

* E-mail: baoqing.sun@sdu.edu.cn

目标场景的像。随着现代半导体工艺的迅猛发展,电荷耦合器件(CCD)和互补金属氧化物半导体(CMOS)已经可以直接捕获亿级像素数的图像。然而,多像素化相机也有其固有的缺点,如随着像素数的增加,成本越来越昂贵,因硅的响应波段约为 400~800 nm,非可见光波段的图像难以直接捕获等。

相比于多像素化相机,单像素成像(SPI)既可降低成本,又可捕获特殊波段的图像,且能在极弱光强度下成像,故已成为近些年来科研工作者所研究的对象。单像素成像的历史最早可以追溯到逐点扫描成像技术^[1],1995年,马里兰大学的史砚华教授团队第一次实现了量子纠缠光源关联成像^[2](又被称为“鬼成像”),此后几年,量子纠缠被视作关联成像的必要条件,直到2002年,罗切斯特大学的Boyd团队使用经典光源,通过实验实现了关联成像^[3]。在关联成像技术中,用具有一定空间分布的光源调制器件调制照明光源,并用分束器将光束分为物光光路和参考光路两部分。在物光光路上,光束照射于物体,用不具有空间分辨能力的桶探测器(亦称单像素探测器)收集总光强;而在参考光路上,光束直接被具有空间分辨能力的探测器(如CCD)探测。最后将两束光路的探测光强度进行关联运算,从而重构出探测物体的空间分布信息。显然,在理论上,关联成像技术似乎是完美的,能够精确地重构出物体的空间分布信息,但是,在实验中,照明光源强度的波动、探测器的暗电流以及具有一定空间分布的光源调制器的效率不稳定等是必然存在的,会导致系统内出现噪声,从而影响重构物体的信噪比(SNR)。为了能够解决这个难题,意大利英苏布里亚大学和英国格拉斯哥大学的研究人员分别利用差分鬼成像^[4]和归一化鬼成像^[5]来抑制探测噪声,最终将重构物体的信噪比提升了几个数量级。2008年,美国麻省理工学院的Shapiro教授团队通过在实验上使用空间光调制器(SLM)实现了计算鬼成像^[6],首先将生成的掩模图案序列加载到SLM上,接着对重构物体进行空间结构光采样,省略了参考光路,有效地提高了重构物体的成像质量和信噪比。实际上,类似的关联成像思想早在20世纪70年代就已出现^[7],被称为空间多路复用(Spatial multiplexing),受限于当时的科学技术条件,研究人员只能通过手动多次更换掩模板,来调整结构光,从而实现最终的重构。

除了上述基于关联算法的单像素成像,还有基于压缩感知理论的单像素成像。21世纪初,压缩感

知理论^[8-10]的提出,打破了奈奎斯特采样定理对采样频率的限制,为单像素计算成像提供了一种新方案。压缩感知理论旨在通过利用图像的稀疏特性,以远低于奈奎斯特采样频率的采样率对待成像物体进行采样,能够精确重构出目标物体的空间分布信息。2008年,Rice大学的科研人员提出单像素相机^[11]的概念,丰富了单像素成像理论。单像素相机通过利用数字微镜设备^[12-13](DMD)实现了对调制图案的快速转换,并利用投影镜头将每次已调制的结构光投影在待成像物体上,使用光电探测器探测被目标物体反射的光强度,使用哈尔小波基作为稀疏采样基,用于对欠定采样数据的稀疏重构,最终实现了清晰的重构成像。而目标物体的成像质量,取决于目标图像在其变换域中的稀疏性,若其稀疏性越大,则成像的质量越高,反之亦然。之后,又有科研人员不断优化重构算法,提升了单像素相机成像的质量^[14-20]。

单像素成像不仅可以对二维物体成像,利用光飞行时间法^[21-23]和立体视觉法^[24-25]等方法,还可以对三维物体进行成像^[18,26-30],进而可以将单像素成像应用在生活中更多领域。2013年,英国格拉斯哥大学的研究人员通过实验在4个不同的位置上分别放置探测器。由亥姆霍兹互易定律分别得到不同视角下的二维图像,利用阴影恢复形状(SFS)技术恢复出目标的三维信息^[26]。2016年,格拉斯哥大学的研究人员又利用飞行时间法和压缩感知算法,实现了高质量单像素三维成像^[27]。2018年,研究人员将深度学习理论应用于单像素成像中,成功实现了视频帧率超过30Hz的视频成像^[31],其可以在气体传感、三维成像和计量学等领域起到非常重要的作用。近年来,随着科研人员对单像素成像研究的不断深入,单像素成像在红外成像^[32-34]、太赫兹成像^[35-40]、X射线成像^[41-44]、多光谱成像^[33-34,45-47]、荧光寿命成像^[48-49]、遥感成像^[50-53]、超快成像^[54-57]、光学加密^[58-61]、非视域成像^[28,37,62]等领域展示出了巨大的应用潜力和广阔的应用前景。本文主要对单像素成像的信噪比研究以及单像素成像在特殊波段甚至在原子、中子等的研究进行了讨论,对比了单像素成像和多像素化相机的成像时间,结果表明单像素成像在成像时间方面有一定劣势,最后对超快成像进行了讨论。

2 单像素成像基本原理

2.1 单像素成像的数学理论

从数学上来看,一幅像素数为 M 的灰度图像就

是一个二维数组,可将其展开为一维数组,即

$$\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_M)^T, \quad (1)$$

式中, x_1, x_2, \dots, x_M 为待求的 M 个未知像素值, $(\cdot)^T$ 表示求矩阵的转置矩阵, \mathbf{X} 为待成像物体数字化后的二维数组展开成的一维数组,即 M 维列向量。重构图像则是求 x_1, x_2, \dots, x_M 等 M 个未知像素值。

实质上,二维掩模图案调制的具有特定空间分布的结构光,也是一个二维数组,将其展开为一维数组,可表示为

$$\mathbf{A}_n = (a_{n1}, a_{n2}, \dots, a_{nM})。 \quad (2)$$

式中, $a_{n1}, a_{n2}, \dots, a_{nM}$ 为对应于列向量 \mathbf{X} 中 M 个像素值的结构光的值, \mathbf{A}_n 为第 n 次结构光照明数字化后的二维数组展开成的一维数组,即 M 维行向量。在单像素成像中,不考虑压缩感知理论,重构图像需要进行 N 次结构光照明, $N \geq M$ 。而 N 次结构光照明可根据 (2) 式,组成一个二维数组,即 $\mathbf{A} = (\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2, \dots, \mathbf{A}_N)^T$, 即 $\mathbf{A} = [a_{nm}]$ 是一个 $N \times M$ 的测量矩阵。每一次结构光照明时,单像素探测器都可以探测到一个由目标物体反射或透射的光强度值 y_n , 故 N 次结构光照明时,单像素探测器探测的 N 个光强度值,组成了一个 N 维列向量,即 $\mathbf{Y} = (y_1, y_2, \dots, y_N)^T$ 。

最后,从数学的角度来说,单像素成像的数据采集过程可以理解为两个矩阵求内积的过程,即

$$\mathbf{Y} = \mathbf{A}\mathbf{X}, \quad (3)$$

而图像重建过程则是矩阵的求逆过程,即

$$\mathbf{X} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{Y}, \quad (4)$$

式中, \mathbf{A}^{-1} 表示对矩阵 \mathbf{A} 求逆运算。若 \mathbf{A} 为正交矩阵,如 Hadamard 矩阵^[63] (如图 1 所示)、单位矩阵

等,则图像重建过程更为简单,不需要复杂的求逆运算, $\mathbf{X} = \mathbf{A}^T\mathbf{Y}$ 。

2.2 基于关联算法的单像素成像理论

量子鬼成像利用纠缠光子对实现成像,相关的光子对形成两束,一束通过物体到达单像素探测器,另一束被多像素探测器探测,最终利用两束光的关联特性成像。经过多年发展后,基于关联算法,经典光源经过调制也可以实现鬼成像,故也称单像素关联成像,研究人员会使用旋转的毛玻璃^[64] 或砂纸^[65] 等作为调制器产生一系列散斑。以用旋转的毛玻璃为例,将通过旋转毛玻璃后的结构光分成两束,一束通过物体,反射或透射后的光强信息被一个不具有空间分辨能力的桶探测器采集,另一束的结构光作为参考光,其光强信息被具有空间分辨能力的面阵探测器采集。使用关联算法,利用这两个探测器采集的值就可以重构物体的像。重构过程为:将桶探测器采集的光强序列值作为每个对应结构光的权重,与对应的结构光光强序列相乘,然后将加权后的序列求和求期望得到重构图像,表达为

$$\hat{X}(x, y) = \langle [s(i) - \langle s(i) \rangle] \times I_i(x, y) \rangle, \quad (5)$$

式中对单像素探测器采集到的光强序列值进行了零均值化处理,其中 $\langle \cdot \rangle$ 表示求期望值操作,“ \times ”表示逐点相乘操作, $s(i)$ 表示桶探测器在 i 时刻探测得到的光强度值, $I_i(x, y)$ 表示多像素化探测器采集到的结构光强度, $\hat{X}(x, y)$ 表示重构图像的强度信息。

随着该领域的深入发展,研究人员使用空间光调制器加载已知的结构光场,实现了计算鬼成像和单像素相机成像。利用空间光调制器节省了一路光路,并且可以根据需求加载不同的结构光场来提高成像速度和质量。空间光调制器加载的结构光场可以是正交基也可以是非正交基。正交基有 Hadamard 矩阵、傅里叶正交基、单位矩阵等,非正交基有散斑图、二值随机矩阵等。

在这种单像素成像系统中有两种调制方式,空间光调制器放置在物体之前为主动照明模式,或称为结构照明;放置在物体之后的调制方式为被动照明模式,或称为结构探测。计算鬼成像一般使用主动照明模式,单像素相机一般使用被动照明模式。

图 2(a) 为主动照明模式,光源发出的光经过空间光调制器调制,调制后的结构光照射到物体上,经物体反射或透射后的光强信息由单像素探测器采集。交换图 2(a) 系统的光源和单像素探测器位置,则为被动照明模式,如图 2(b) 所示,光源照射物体,经物体反射或透射后的光强信息经过空间光调制器

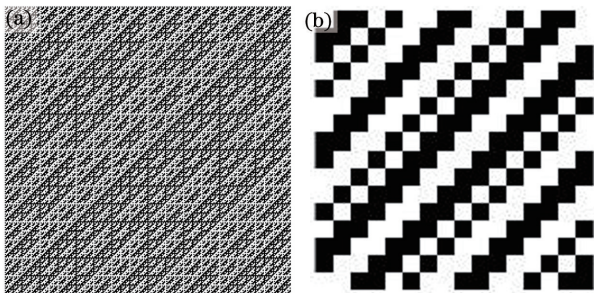


图 1 Hadamard 矩阵。(a) Matlab 生成的 256 阶 Hadamard 矩阵,分辨率为 256×256 ; (b) 第 16 行生成的结构光图,分辨率为 16×16

Fig. 1 Hadamard matrix. (a) 256-order Hadamard matrix generated by Matlab with a resolution of 256×256 ; (b) structured light map generated on the 16th line with a resolution of 16×16

后,由单像素探测器探测。图 2(a)的光源、透镜、空间光调制器可等效称之为一个有空间分辨能力的光源,探测器为没有空间分辨能力的单像素探测器。

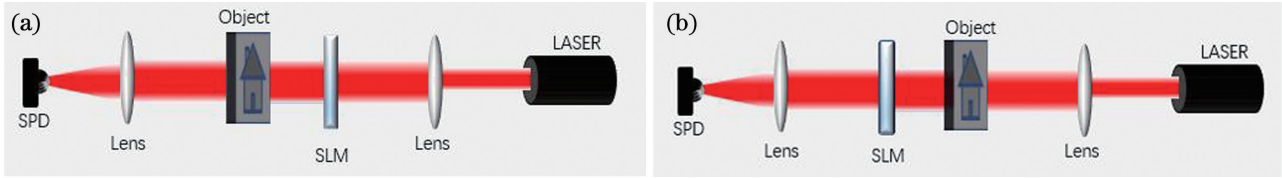


图 2 单像素成像原理图。(a) 单像素成像的主动照明模式;(b)单像素成像的被动照明模式

Fig. 2 Illustration of single-pixel imaging. (a) Active illumination mode for single-pixel imaging; (b) passive illumination mode for single-pixel imaging

2.3 基于压缩感知的单像素成像理论

压缩感知的前提是大多数自然物体信号在某些变换域下具有稀疏性^[66],如小波变换域或傅里叶变换域等,表达式为

$$\mathbf{X} = \Psi \mathbf{C}, \quad (6)$$

式中: Ψ 是变换矩阵,维数为 $M \times M$; \mathbf{C} 是物体信号在变换域的稀疏表示, \mathbf{C} 中很多项为 0,体现了其稀疏性。于是单像素成像可以表示为

$$\mathbf{A} \Psi \mathbf{C} = \mathbf{Y}. \quad (7)$$

\mathbf{A} 与 Ψ 相乘得到传感矩阵 \mathbf{S} ,其大小为 $N \times M$,故得到 $\mathbf{S} \mathbf{C} = \mathbf{Y}$ 。此时, \mathbf{S} 不是满秩矩阵,其没有逆矩阵。当 \mathbf{S} 满足约束等距性条件^[67-68](RIP)时,可以求得 \mathbf{C} 的最优解,从而求出 \mathbf{X} ,重构出图像。虽然压缩感知理论可以减少探测次数,但是其增加了计算要求,因此一般应用于需要减少采样时间而不是实时成像的单像素成像中。

3 基于不同采样方式的图像信噪比分析

近年来,单像素成像取得了很好的研究成果,但是,针对单像素成像中不同扫描采样方式的比较却很少涉及。鉴于此,本课题组讨论了两种采样方式:逐点扫描(RS)和多像素结构扫描(MS),并详细比较了RS和MS在成像中的不同特性^[69],这对以后在单像素成像中采用何种扫描采样方式来获得更好的实验成果具有一定的指导意义。

在单像素成像系统中,噪声是不可避免的。针对噪声在单像素成像重构图像上的影响,可采用传统成像领域重构图像中的评价指标 SNR 来进行表征,表达式为

$$R_{SN} = \frac{P_{\text{signal}}}{P_{\text{noise}}}, \quad (8)$$

式中, P_{signal} 为信号功率, P_{noise} 为噪声功率。通常情

况下,信号项与噪声项的功率谱是不易得到的,所以可采用另一种信噪比的定义方式来表征,即

$$R_{SN} = \frac{\mu}{\sigma}, \quad (9)$$

式中, μ 为重构图像的期望值,即信号项, σ 为重构图像的标准差,即噪声项。

单像素成像采用无空间分辨率的桶探测器进行强度信号的采集,并采用一系列具有特定结构分布的采样矩阵对成像物体进行空间采样,利用迭代关联算法,重构出物体的空间信息。在数学上,单像素成像理论可以表示为

$$\mathbf{Y} = \mathbf{A} \mathbf{X}. \quad (10)$$

在RS中,采样基为单位矩阵 \mathbf{I} ;在MS中,采样基可为Hadamard矩阵、Fourier正交基、二值随机图等。在MS中,若 \mathbf{A} 为正交矩阵,则与RS一样,可实现完美重构;但是,使用二值随机图等非正交基,迭代关联不但会产生信号项,而且会产生串扰噪声^[5],即使在无噪声的情况下也无法实现完美重构。为了对两种采样扫描方式进行同等比较,本课题组在MS中采用正交基Hadamard矩阵。对于RS和MS,在理想情况下,重构算法在数学上可表示为

$$\mathbf{O}(\mathbf{X}) = \mathbf{A}^T \mathbf{Y}, \quad (11)$$

式中 $\mathbf{O}(\mathbf{X})$ 为重构图像。(11)式为无噪声条件下的重构。在实际的单像素成像系统中,噪声是必然存在的,分为乘性噪声(如照明强度的波动噪声、采样矩阵畸变产生的噪声和传输介质散射噪声等)和加性噪声(如光电探测器的暗噪声和背景杂散光产生的噪声等)。在这里,主要考虑照明强度的波动噪声和探测器暗噪声,即

$$\mathbf{O}(\mathbf{X}) = \mathbf{A}^T (\mathbf{a} \mathbf{Y} + \mathbf{n}_{\text{noise}}), \quad (12)$$

式中: \mathbf{a} 为 $N \times N$ 的对角矩阵,其对角线元素表示照明强度的大小; $\mathbf{n}_{\text{noise}}$ 为 N 维列向量,表示探测器的暗噪声。一般说来, α_{ii} 为对角矩阵 \mathbf{a} 中第 i 行第

i 列的元素,服从泊松分布 $P_a(E_a, \sigma_a^2)$, E_a 表示照明光源的平均强度, σ_a^2 为照明光源波动的方差,表示照明光源强度的波动程度; $\mathbf{n}_{\text{noise},i}$ 为列向量 $\mathbf{n}_{\text{noise}}$ 中第 i 个元素,服从高斯分布 $N(0, \sigma_n^2)$, σ_n^2 为探测器暗噪声的方差,表示探测器暗噪声的波动程度。光照强度的波动和探测器噪声都会以噪声的形式影响最终待成像物体的重构。为了定量分析重构结果的质量,将 $\mathbf{O}(\mathbf{X})$ 的信噪比定义为

$$R_{\text{SN}} = \frac{\langle \mathbf{O}(\mathbf{X}) \rangle}{\sqrt{\langle (\mathbf{O}(\mathbf{X}) - \langle \mathbf{O}(\mathbf{X}) \rangle)^2 \rangle}}, \quad (13)$$

式中, $\langle \mathbf{O}(\mathbf{X}) \rangle$ 为 $\mathbf{O}(\mathbf{X})$ 的期望值,即信号项; $\sqrt{\langle (\mathbf{O}(\mathbf{X}) - \langle \mathbf{O}(\mathbf{X}) \rangle)^2 \rangle}$ 则表示对应的噪声项。

接下来,将分别考虑探测器噪声和光照强度波动产生的噪声对重构物体信噪比的影响。

3.1 加性噪声(探测器噪声)分析

假设光照强度是恒定不变的,即 $\sigma_a^2 = 0$,光照强度恒为 E_a ,故只计算探测器噪声对重构物体信噪比的影响。对于 RS,光强聚焦在一个像素点上,且每个像素点只被采集一次,故 $R_{\text{SN}} = \frac{E_a}{\sigma_n}$;对于 MS,列向量 \mathbf{X} 中的每个元素在采样过程中均被

采集 M 次,且 Hadamard 矩阵在每次采样过程中对列向量 \mathbf{X} 中的每个元素均采集一次,累加 M 次测量的结果,则 SNR 中的信号项相对于 RS 而言,放大了 M 倍,而噪声项只放大了 \sqrt{M} 倍。这说明 MS 有“平衡噪声”的功能,故 MS 的信噪比比 RS 的信噪比放大了 \sqrt{M} 倍。但是,在 MS 中,总的光照功率要被平均分散到 M 个像素点上,如果总的光照强度恒定不变,物体的每个像素点只能得到总光照强度的 $1/M$,那么此时 MS 信噪比中的信号项对于 RS 来说,是不变的,为 E_a ,而噪声项仍然是放大了 \sqrt{M} 倍,故 MS 的信噪比比 RS 的信噪比缩小了 \sqrt{M} 倍^[7]。那么对于光源照明总功率确定的情况下,与多像素结构扫描 MS 的扩束照明相比,RS 将光照强度会聚于一个像素点上,取得 M 倍 MS 单点像素的照明强度,虽然 MS 可以均化噪声,但 RS 可以得到 \sqrt{M} 倍的 MS 的信噪比。

对于上述理论,为了更有说服力,并验证理论的正确性,本课题组做了模拟仿真和实验,两者的结果见图 3^[69]。


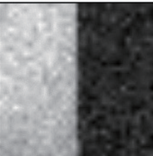
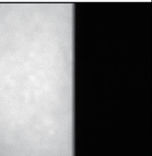




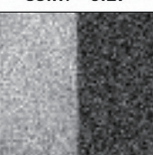
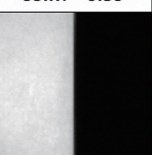



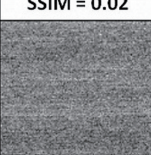
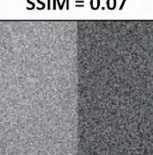
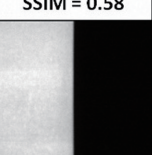
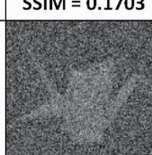
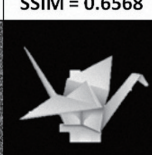

(a)				(b)				
	RS _D	MS	RS _G		RS _D	MS	RS _G	
Experiment	32x32-pixel				32x32-pixel			
		SNR = 0.307	SNR = 10.299	SNR = 320.497		SNR = 14.35	SNR = 467.13	SNR = 14690
		SSIM = 0.02	SSIM = 0.27	SSIM = 0.59		SSIM = 0.3756	SSIM = 0.9272	SSIM = 0.9998
	64x64-pixel				64x64-pixel			
		SNR = 0.074	SNR = 4.761	SNR = 306.006		SNR = 4.17	SNR = 262.35	SNR = 16566.9
		SSIM = 0.02	SSIM = 0.07	SSIM = 0.58		SSIM = 0.1703	SSIM = 0.6568	SSIM = 0.9999
128x128-pixel				128x128-pixel				
	SNR = 0.019	SNR = 2.478	SNR = 316.040		SNR = 1.00	SNR = 128.39	SNR = 16538	
	SSIM = 0.04	SSIM = 0.06	SSIM = 0.53		SSIM = 0.0362	SSIM = 0.3952	SSIM = 1	

图 3 加性噪声影响下的单像素成像结果^[69]。(a)三种不同成像条件下对半白半黑板的实验重构;(b)对常见物体的仿真重构

Fig. 3 Results of single-pixel imaging under additive noise^[69]. (a) Experimental reconstruction of half white and half blackboard under three different imaging conditions; (b) simulation reconstruction of common objects

在实验中,保持激光器输出稳定,使得光源照明强度的波动可忽略不计,故只考虑加性噪声(探测器噪声)。当保持电源电压和探测器的温度稳定时,能够保证探测器的噪声保持在一个较为稳定的量级。以半黑半白板作为实验对象,在三种不同的成像条件中对其进行重构,实验结果如图 3(a) 所示:首先,在三种不同的成像条件下,光源的总光强是相等的;其次,利用 DMD 调制将光强照射在半黑半白板上,利用 RS 方法,得到左列 RS_D 数据,利用 MS 方法,得到中间列 MS 数据;然后,将总光强聚集在一个点上,利用二维扫描振镜,逐点扫描,得到右列 RS_G 数据。为了使数据更具有说服力,不仅计算出三种不同成像条件下的信噪比,还以结构相似度(SSIM)为标准进行了对比分析。通过实验结果和模拟仿真结果的分析,可以知道在 RS_D 、MS、 RS_G 等三种成像条件下,在误差允许的范围内,信噪比是以 \sqrt{M} 倍放大;结构相似度虽没有像信噪比那样有明确的比例关系,但其变化趋势与以信噪比为标准的变化趋势相吻合,由此进一步说明了理论的正确性。

加性噪声与物体的空间分布无关,可以单独计算,而乘性噪声较为复杂,与物体的空间分布有关,

无法单独分开计算。

3.2 乘性噪声(光照强度波动)分析

为了更好地体现出照明波动对单像素成像系统的影响,在实验中采用了可编程的 LED 来控制照明变化。与此同时,为了尽最大努力降低加性噪声(探测器噪声)的影响,在以 $64 \text{ pixel} \times 64 \text{ pixel}$ 为分辨率的情况下,设置 RS 重构的每次采样样本数是 MS 采样样本数的 4096 倍,以使 RS、MS 等两种不同采样方式的探测器噪声水平保持在同一量级。在实验中,分别设置了正弦波动噪声和高斯随机波动噪声等两种不同的光照波动。在正弦波动噪声情况下,重构结果如图 4(a) 所示,对于 RS,其重构图像中存在条纹结构,直接反映了照明结构的不稳定性。因为完整的一个成像周期远远大于照明结构波动的周期,故对于 RS,其成像质量与扫描频率不相关。而对于 MS 来说,差分测量可以抑制光照周期性的波动,然而这种抑制作用并不一定能够使得 MS 具有比 RS 更好的重构结果。而在实际中,相对于 RS,MS 更容易受到乘性噪声的影响。如图 4(b) 所示,在模拟实验中,在高斯噪声情况下,使用一个普通物体作为成像物体,MS 的重构结构表现得比 RS 差很多。

		Experiment		Simulation				Experiment		Simulation	
(a)		RS	MS	RS	MS	(b)		RS	MS	RS	MS
Sine-wave fluctuation noise	20 kHz					Gaussian fluctuation noise	0.028				
		SNR = 48.92	SNR = 66.18	SNR = 9.60	SNR = 10.45			SNR = 18.73	SNR = 12.03	SNR = 14.28	SNR = 3.94
		SSIM = 0.267	SSIM = 0.399	SSIM = 0.846	SSIM = 0.272			SSIM = 0.196	SSIM = 0.137	SSIM = 0.867	SSIM = 0.175
	10 kHz						0.056				
		SNR = 46.79	SNR = 33.26	SNR = 9.62	SNR = 9.34			SNR = 9.48	SNR = 5.90	SNR = 7.74	SNR = 2.19
		SSIM = 0.269	SSIM = 0.369	SSIM = 0.841	SSIM = 0.212			SSIM = 0.135	SSIM = 0.086	SSIM = 0.860	SSIM = 0.117

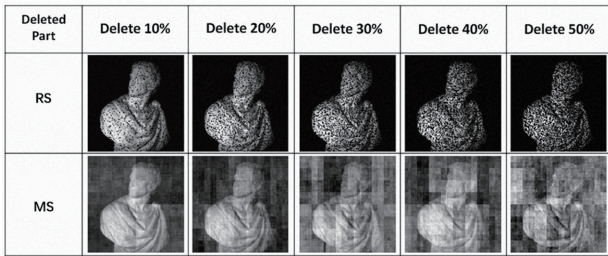
图 4 乘性噪声影响下的单像素成像结果^[69]。(a)光源正弦波动照明下的实验和模拟结果,正弦频率为100 Hz,振幅为照明功率的 1/10;(b)光源高斯波动照明下的实验和模拟结果,其中高斯噪声的方差为照明功率的 2.8%和 5.6%

Fig. 4 Results of single-pixel imaging under multiplicative noise^[69]. (a) Experimental and simulation results under sinusoidal wave illumination of light source, when the sinusoidal frequency is 100 Hz, and the amplitude is 1/10 of the lighting power; (b) experimental and simulation results under Gaussian wave illumination of light source, in which the variance of Gaussian noise is 2.8% and 5.6% of the lighting power

接着,研究探测值序列部分缺失对重构图像信噪比的影响。在实验中,通过对探测值序列进行 10%、20%、30%、40%和 50%的随机删除,来模拟

实际情况中部分探测值缺失或无效的情况下,乘性噪声对 RS 和 MS 重构图像的影响,如图 5 所示^[70]。

对于 RS,探测值是对某一扫描位置反射信号强

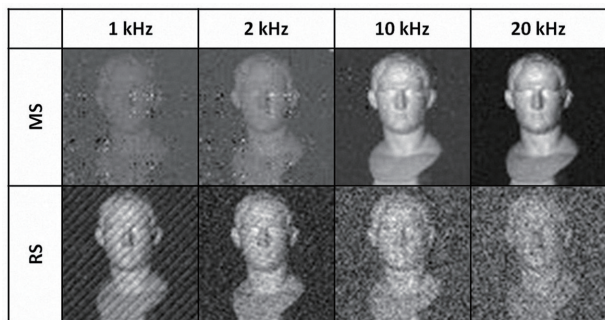
图 5 RS 和 MS 在部分探测值缺失下的重构图像^[70]Fig. 5 Reconstructed images of RS and MS under partial missing detections^[70]

度的直接记录,探测值缺失直接反映为对应位置重构数值的缺失,且无法通过同一探测周期内其他的探测值来恢复。对于 MS,不存在探测值和位置一一对应的关系,探测值缺失越多,整体重构信噪比越低。

总而言之,对于乘性噪声,无法得出 RS 和 MS 孰优孰劣的结论,在不同乘性噪声下,RS 和 MS 有着不同的退化方式。在 RS 中,乘性噪声影响的是当前采样信号的探测值;在 MS 中,乘性噪声影响的是整体的重构信噪比。

3.3 多种噪声存在情况分析

在之前单独对加性噪声和乘性噪声的分析中,无法直接得出 RS 和 MS 哪一种完全优于另一种的结论。针对多种噪声共存的情况分析,本研究考虑探测器暗噪声和光照波动噪声同时存在时的影响。在实验中,将一个 LED 用于环境照明,将石膏人像作为目标成像物体,设定系统乘性噪声为以 100 Hz 为波动周期的正弦波,利用 DMD 调制掩模图案进行空间采样和相关运算,并采用 4 种不同的结构采样刷新频率作为对比进行实验重构,结果如图 6 所示。

图 6 被动照明情况下 RS 和 MS 在不同采样刷新频率下的重构图像^[69]Fig. 6 Reconstructed images of RS and MS under different sampling refresh rates under passive illumination^[69]

由重构结果分析可知,MS 在 20 kHz 的采样刷新频率下取得了最佳的重构结构。对于 RS,在

刷新频率为 1 kHz 时,重构图像中存在周期变化的条纹结构,主要受到光照波动的影响,随着结构采样刷新频率的增加,重构的主要噪声逐渐变为探测器噪声,刷新频率为 20 kHz 时,重构信息基本上被探测器噪声淹没,RS 对加性噪声和乘性噪声均比较敏感;而对于 MS,在刷新频率较低时,MS 对光源照明波动噪声比较敏感,对探测器噪声抑制作用较为明显。总而言之,在给定的被动照明情况下,MS 在刷新频率更高时,仍获得了最好的重构结果。

4 特殊波段单像素成像

在可见光波段,传统面阵探测器已经得到了深入的研究,运用单像素成像技术并不能获得很大的收益,但在面阵探测器的成本、灵敏度、分辨率等技术挑战的领域,单像素成像因其装置简单,成本低,以及弱光成像、近场成像可以突破衍射极限等优势,脱颖而出。在红外、太赫兹、X 射线波段以及原子、中子和电子等领域取得了一定进展。

4.1 红外波段单像素成像

红外波段有大量可适用的响应度快的空间光调制器,单像素成像在红外波段已经得到了广泛研究。2014 年,Glasgow 大学的研究人员实现了一个使用单像素成像技术的显微镜系统^[34],能在可见光波段和短波红外波段同时成像。该系统能够以近视频速率的帧率生成图像,并且可根据需要灵活地改变分辨率和帧率。他们引入了一种压缩技术,显著提高了预测帧率。该技术极大地降低了成本,提高了仪器的灵活性,简化了红外成像系统,未来可能还可应用于其他波段,有望增加光谱成像的范围。

2017 年,Glasgow 大学的研究人员用单像素技术制作了甲烷气体实时成像视频^[32]。将红外激光二极管的工作波长调节至甲烷气体的吸收线,激光经过 DMD 调制后照射到场景中,甲烷气体透射的光强信息被一个单像素探测器采集,并以 25 frame/s 的帧率成像,所成像的分辨率为 16 pixel×16 pixel,然后将低分辨率气体图像进行上采样和平滑处理后与高分辨率彩色图像叠加,较好地实现了气体源定位,实验结果如图 7 所示。该实验装置简单,成本相对面阵探测器低很多,故在工业和环境监测、医疗诊断等领域有很好的应用前景。

4.2 太赫兹波段单像素成像

太赫兹波对一些非极性物质是透明的,具有穿透性,且能量较低,没有破坏性,对极性物质等不透

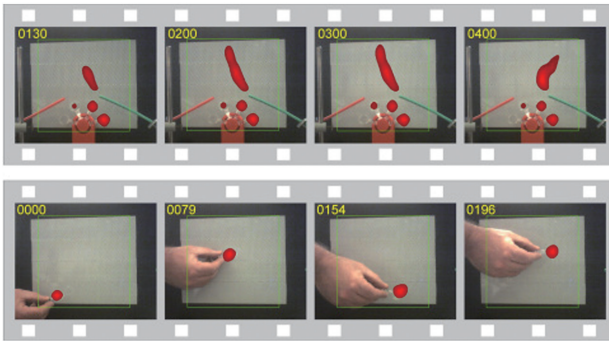


图 7 甲烷泄露气体的实时成像^[32]

Fig. 7 Real-time imaging of methane gas leaks^[32]

明。基于此可以进行太赫兹成像,其在系统探测等方面应用广泛。但是太赫兹波段的探测器的成本极高,并且太赫兹波长较长,由于衍射极限,其远场成像的分辨率不高。而单像素成像可以显著降低成本,改善分辨率。2016年,Exeter大学和Glasgow大学的研究人员用单像素成像技术实现了近场太赫兹成像^[37]。该实验用DMD对800nm的泵浦脉冲进行空间调制,调制后的光打到Si表面后,光激发区域呈现导电性,因此太赫兹波不能穿透该区域,实现了对太赫兹波的调制,如图8所示。

再用单像素探测器接收物体透射的太赫兹辐射,利用探测值和空间光的关联计算实现了对电路板内的结构成像,且具有亚波长的高分辨率,并利用极化的性质探测了导线的亚波长缺陷。实验还证明用Hadamard矩阵作掩模优于光栅扫描、随机矩阵

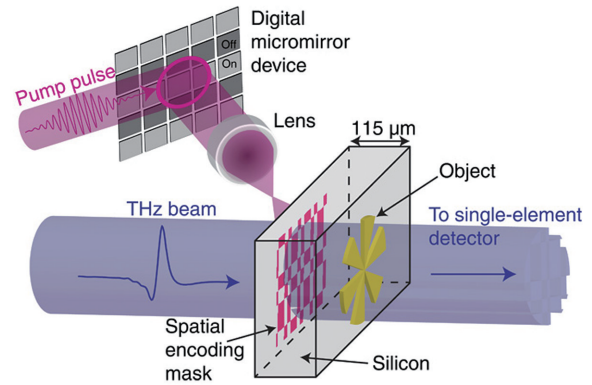


图 8 近场单像素太赫兹成像示意图^[37]

Fig. 8 Schematic illustration of near-field, single-pixel THz imaging^[37]

作掩模。该工作保留了传统太赫兹成像的优点,同时降低了成本,大幅提高了分辨率,可以应用在医学探测等非侵入式成像中。

4.3 X射线单像素成像

X射线波长短、能量高,具有很高的穿透性,且物质密度不同,穿透能力不同。基于这些特性,X射线成像可应用于医学诊断和工业检测等领域。但高剂量X射线辐射生物体时可使生物体细胞受到破坏,因此实现低辐射剂量X射线的成像具有重要意义。2018年,中国科学院的研究人员实现了超低辐射剂量的台面式X射线鬼成像^[71],单位分辨率为 $0.4\text{ mm} \times 0.4\text{ mm}$,在每个成像分辨率区域只需480个光子数。实验方案如图9所示。

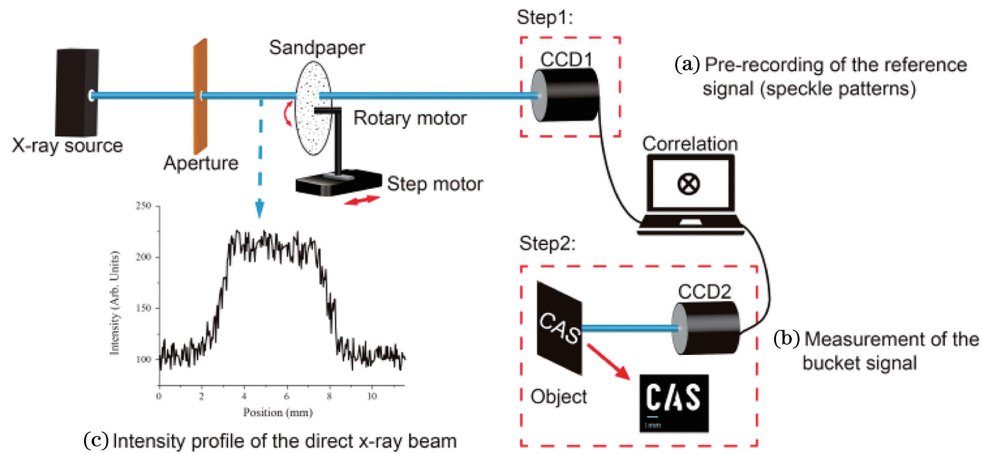


图 9 X射线鬼成像实验原理^[71]。(a)用 CCD1 预先记录参考散斑图;(b)物体的反射光场由桶检测器 CCD1/CCD2 记录下来,物体和 CCD1 在同一平面上;(c)直射 X 射线束的剖面图

Fig. 9 Experimental schematic of X-ray ghost imaging^[71]. (a) Reference speckle patterns are pre-recorded with CCD1; (b) field transmitted by the object is then recorded by bucket detector CCD1/CCD2, and the object and CCD1 are in the same plane; (c) profile of the direct X-ray beam

该实验利用一个紧凑的桌面式 X 射线源作为照明源,出射光束通过一张旋转的布有碳化硅的砂

纸产生赝热光作为参考信号,用一个 CCD 探测,其探测值积分等效于单像素探测器的探测值,再使用

一个更高灵敏度的 CCD 探测物光。实验装置体积小且成本低,并且对物体的曝光时间可尽可能短,对参考信号的曝光时间可尽可能长,极大地降低了 X 射线成像的辐射剂量,这一点对于医学 X 射线成像来说意义重大,可以减小 X 射线对人体的危害。但该实验重构图的分辨率不是很高,限制了其在医学成像的应用。

2020 年,同一课题组在超低辐射剂量的基础上

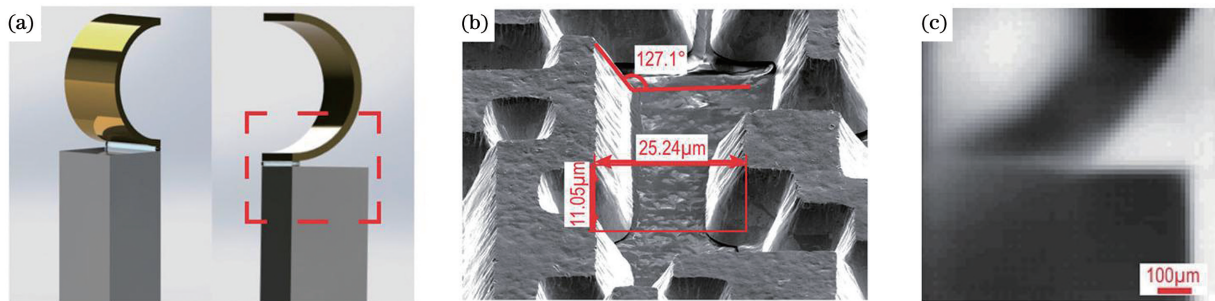


图 10 X 射线光鬼成像的物体和成像结果^[65]。(a)两个不同角度的物体三维视图,虚线包围的区域是物体被实际曝光的部分;(b)部分物体的扫描电子显微镜图像;(c)经 768 次曝光后用 CH-MWCNN 算法重建的图像

Fig. 10 Object and images of X-ray ghost imaging^[65]. (a) Two 3D views of the object from different angles where the area enclosed by the dashed line is the actually exposed part of the object; (b) scanning electron microscope image of part of the object; (c) image reconstructed by CH-MWCNN after 768 exposures

4.4 原子鬼成像

鬼成像自提出以来基本都是用光子来实现的,2016 年,澳大利亚国立大学的研究人员开创性地利用原子实现了鬼成像^[72],分辨率达到亚毫米量级。该实验利用超低温氦原子之间的 s 波碰撞产生了二阶相关的原子对,形成两束原子,一束通过物体到达单像素探测器,另一束被面阵探测器探测,对两路信号进行关联成像。该实验的关键点之一是保持原子对高相关。研究者在每次实验中通过使用高阶 Kapitza-Dirac 衍射产生了多个不同的 s 波散射原子源,极大地增加了高度相关的原子对数量,提高了数据采样率。该工作颠覆了只能用光子实现鬼成像的认知,为用重粒子证明量子力学中某些基本概念提供了一个方向,有助于量子纠缠技术的发展,有望应用于实时控制纳米器件的制造技术中。

4.5 中子单像素成像

与光子的性质不同,中子是电中性的费米子,有自旋磁矩和波粒二象性,与物质相互作用弱而无破坏性。与 X 射线相比,中子对金属具有更强的穿透性,对轻元素灵敏,可以区分同位素。基于这些特性,中子成像在生物医学检测、文物分析等领域发挥了重大的作用。传统中子成像所需的中子通量大,设备昂贵复杂,难以操作。2020 年,He 等^[73]研究

实现了高分辨率欠采样非相干 X 射线成像^[65]。该实验用 Hadamard 矩阵作掩模,用单像素探测器探测物光而不再使用 CCD 探测。研究出了一种可压缩 Hadamard 矩阵和多级小波卷积神经网络(CH-MWCNN)算法,得到了 10 μm 的高分辨率重构图,压缩率为 18.75%,恢复时间仅为 0.3 s。物体和重构效果如图 10 所示^[65]。实验结果非常好,证明该技术在医学成像领域,具有极高的实用价值。

了一种单像素中子成像方案,该方案不仅实验设备简易,重构的分辨率高,还极大地降低了所需的中子通量。实验在硅模具上刻蚀正交 Hadamard 矩阵,作为调制掩模。再将热中子具有强吸收的 Gd_2O_3 粉末压入到硅模具里面,实现了对中子束的调制。将掩模的中子束照射物体,经过物体的强度信息被单像素探测器接收。最终将探测信号与调制掩模进行关联计算,完成成像。最后在低照度下每帧模式只需 1000 个中子数就能实现重构,重构结果中空间分辨率达到了 100 μm ,很好地改善了传统中子成像的不足。但该项技术应用到实际当中还存在一些难点,主要是其调制掩模采用刻蚀模板的方法,采样所需要的时间较长,如果未来可以研发出提高调制速度的方法,其应用前景将会更加广阔。

4.6 电子鬼成像

2018 年,SLAC 国家加速器实验室的研究人员首次用电子实现了鬼成像^[74],实验装置如图 11 所示。

激光器产生 266 nm 的激光脉冲,经 DMD 调制后打在光电阴极上产生电子束,再通过枪螺线管打在物体上,最终被单像素探测器探测,其探测值和 DMD 的结构照明图案进行关联计算完成了鬼成像,计算过程中运用压缩感知算法提高了成像质量。

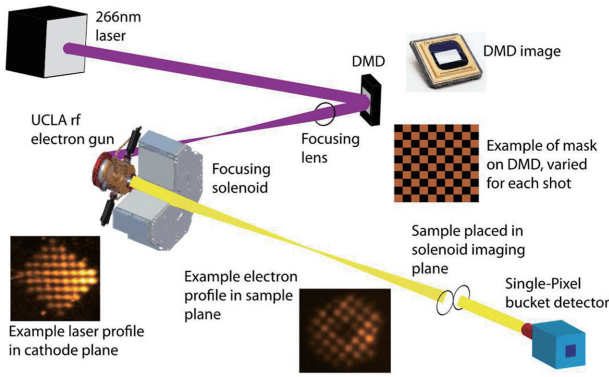


图 11 电子鬼成像实验原理图^[74]

Fig. 11 Schematics of electron ghost imaging experiment^[74]

此项工作证明激光驱动的粒子源可以实现计算鬼成像,缩短了图像采样时间,降低了电子辐射剂量,减少了对成像物体的破坏,可以应用于时间分辨电子散射等领域中。

5 快速单像素成像

在单像素成像中,重构一帧高质量的图像需要进行大量的采样,在采样过程中,物体需要保持静止或近乎静止,才能得到清晰的重构图像,如果在采样过程中目标物体发生移动,重构结果会产生严重的运动模糊现象^[75]。

为了解决传统单像素成像的低帧率问题,人们提出许多不同的方案来减少重构一幅图像所需的时间,使基于单像素成像的超快成像得以实现。对于传统的单像素成像,每一次采样都需要利用空间光调制器件对光场进行调制,产生所需的结构照明模式。目前,空间光调制器的刷新频率最高可达 22 kHz,但是这依然不足以使单像素系统实现高速成像。由于受到空间光调制器件刷新频率的限制,传统的单像素成像的帧率较低,使其难以对高速运动的物体进行高质量的成像。一般来说,提高单像素成像的帧率有两种途径:提高结构光场的调制频率或减少重构图像所需的采样次数。

5.1 提高结构光场的调制频率

目前,主要有两种思路来实现结构光场调制频率的提高。

第一种思路是利用刷新频率更高的器件来完成对光场的调制,从而得到更高的调制频率^[54]。然而,这种方式最终仍然受制于光场调制器件的刷新频率,而且同时对空间光调制器件提出了更高的要求。

另一种思路是利用其空间上的冗余来实现结构光场调制频率的提高。通常情况下,重构图像的空间分辨率比较低,这就使得所需的结构光场矩阵的空间分辨率要远小于空间光调制器的空间分辨率,利用空间光调制器的冗余空间分辨率,就可以实现结构光场调制频率的大幅提高。清华大学的 Wang 等^[76]提出了一种通过空间扫描实现高速单像素成像的方法,利用一对平行的扫描振镜使光路在 DMD 上扫描,将光束置于 DMD 的不同位置处,可产生不同的随机二值图作为采样结构光场。此外,可以通过物体与静态采样结构光场之间的相对运动,来实现结构光场对目标物体的空间编码^[57]。若静态采样光场图案的空间分辨率为 $U \times V$ ($U < V$),物体沿结构光场长边运动时,可以将整个光场分为 $V - U + 1$ 个 $U \times U$ 的子模式,如图 12 所示。当物体从采样结构光场的一端运动到另一端时,每经过一个像素的距离就会与一个子模式作关联成像,利用桶探测器记录下的连续时间信号,就可以重构出物体图像。经理论分析和实验验证,这种方法对高速运动物体的成像能力仅受制于探测器系统的带宽,利用单像素探测器高带宽的优势,可以对物体高速运动过程进行清晰的重构。

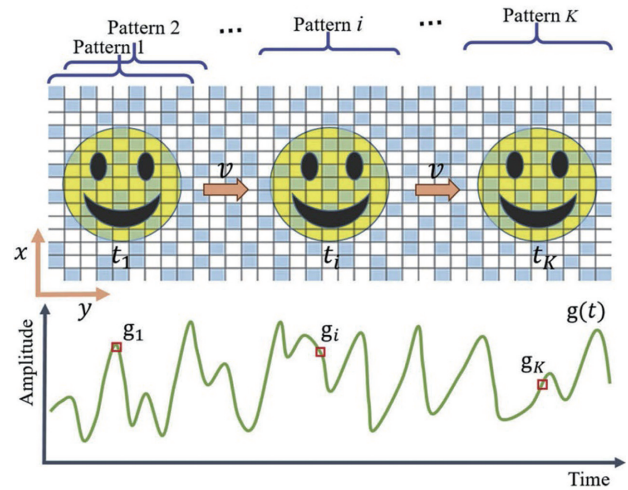


图 12 成像方案示意图^[57]

Fig. 12 Schematic diagram of the imaging scheme^[57]

具有恒定速度的目标沿着静态伪随机照明图案的较长边移动。同时,来自目标的反射光的强度 $g(t)$ 由单个像素检测器进行记录。在整个照明模式中,从目标的运动中划分出 K 个不同的子模式。每个子模式的权重可以从信号 $g(t)$ 中进行提取。然后,以常规 SPI 方法重建运动目标的图像。

5.2 减少重构图像所需的采样次数

除直接提高结构光场的调制频率外,人们还会

通过减少重构图像所需的采样次数,来降低重构一幅图像所需的时间。当物体处于运动状态时,在物体可被视为静止物体的时间内,只能对物体进行少量的采样,这不足以重构出清晰图像。针对这一问题,国防科技大学的 Sun 等^[75]提出了基于互相关运算的计算鬼成像,用于对刚性物体的追踪和成像。这种方法不需要通过大量的采样来获得清晰的图像,而是通过少量采样获得的模糊图像作互相关运算,得到运动物体的轨迹。根据得到的物体轨迹,对得到的一系列模糊图像进行迭代,即可平均掉模糊图像中的噪声,重构出较清晰的图像。并且,随迭代次数的增多,对噪声的抑制增强,所以随着物体运动过程的逐步进行,得到的图像越来越清晰。事实上,在单像素成像被提出不久后,科研人员就开始探索各种方法来减少重构所需的采样次数。2009 年,The Weizmann Institute of Science 的研究人员就提出将压缩感知算法应用于单像素成像领域,成功地使重构所需采样次数减少了一个量级^[77]。

目前,为了提高成像的质量和效率,压缩感知、机器学习或深度学习算法已被广泛地应用于单像素成像各个方面的工作中。在超快成像方面,提高结构光场的调制频率和减少重构图像所需的采样次数通常是并行的,目前的很多工作中都会利用深度学习或压缩感知等算法,在保证成像质量的同时进一步减少采样次数,从而进一步提高单像素成像的帧率。

综合上述内容,虽然快速单像素成像技术在原理、算法上有了多点突破,但是相关技术仍有局限。例如,图 12^[57]所示方案需要依赖物体的特殊运动特性,这在实际应用中几乎是不可能的。因此,如何设计出具有普遍适用性的、具有实用性的快速单像素成像技术,是单像素走向实用化的发展过程中急需解决的一个重要问题,也是未来研究的一个重要方向。

6 结 论

本文首先介绍了近百年来单像素成像的研究进展,阐述了单像素成像相比于多像素化相机的诸多优势,然后从逐点扫描(RS)和基于 Hadamard 采样基的多像素结构扫描(MS)等两种不同的采样方式比较成像信噪比的大小,结果表明不同成像条件下 RS 和 MS 具有各自的优势。主动照明下,RS 能够最大程度地集中光强,从而得到较高的信噪比,MS 能够将噪声平均化;被动照明下,MS 能够得到高于 RS 的信噪比。然后介绍了当前单像素成像在特殊

波段成像中的应用,尤其是在红外、太赫兹、X 射线波段及其对原子、中子等的单像素成像。最后针对单像素成像在成像时间上的劣势,阐述了单像素超快成像的发展。我们认为,如何设计出具有普遍适用性和实用性的快速单像素成像技术,是单像素走向实用化的发展过程中急需解决的一个重要问题,也是未来研究的一个重要方向。尽管单像素成像还有一些不足和劣势,但随着研究人员的深入探索和科学技术的发展,相信在不久的将来,单像素成像一定能够在更多领域得到更好的应用。

参 考 文 献

- [1] Mertz P, Gray F. A theory of scanning and its relation to the characteristics of the transmitted signal in telephotography and television [J]. The Bell System Technical Journal, 1934, 13(3): 464-515.
- [2] Pittman T B, Shih Y H, Strekalov D V, et al. Optical imaging by means of two-photon quantum entanglement [J]. Physical Review A, Atomic, Molecular, and Optical Physics, 1995, 52(5): R3429-R3432.
- [3] 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.
- [4] Ferri F, Magatti D, Lugiato L A, et al. Differential ghost imaging [J]. Physical Review Letters, 2010, 104(25): 253603.
- [5] Sun B Q, Welsh S S, Edgar M P, et al. Normalized ghost imaging [J]. Optics Express, 2012, 20(15): 16892-16901.
- [6] Shapiro J H. Computational ghost imaging [J]. Physical Review A, 2008, 78(6): 061802.
- [7] Harwit M, Sloane N J A. Systematic errors [M]// Harwit M, Sloane N J A. Hadamard transform optics. Amsterdam: Elsevier, 1979: 146-180.
- [8] Donoho D L. Compressed sensing [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(4): 1289-1306.
- [9] Eldar Y C, Kutyniok G. Compressed sensing: theory and applications [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2009.
- [10] Baraniuk R G. Compressive sensing [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2007, 24(4): 118-121.
- [11] 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.
- [12] Sampson J B. Digital micromirror device and its application to projection displays [J]. Journal of

- Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures, 1994, 12(6): 3242-3246.
- [13] Dudley D, Duncan W M, Slaughter J. Emerging digital micromirror device (DMD) applications [J]. Proceedings of SPIE, 2003, 4985: 14-25.
- [14] Magalhães F, Araújo F M, Correia M V, et al. Active illumination single-pixel camera based on compressive sensing [J]. Applied Optics, 2011, 50(4): 405-414.
- [15] Lochocki B, Gambín A, Manzanera S, et al. Single pixel camera ophthalmoscope [J]. Optica, 2016, 3(10): 1056-1059.
- [16] Rousset F, Ducros N, Peyrin F, et al. Time-resolved multispectral imaging based on an adaptive single-pixel camera [J]. Optics Express, 2018, 26(8): 10550-10558.
- [17] Zheng J, Jacobs E L. Video compressive sensing using spatial domain sparsity [J]. Optical Engineering, 2009, 48(8): 087006.
- [18] 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.
- [19] Sun M J, Meng L T, Edgar M P, et al. A Russian Dolls ordering of the Hadamard basis for compressive single-pixel imaging [J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 3464.
- [20] Howland G A, Howell J C. Efficient high-dimensional entanglement imaging with a compressive-sensing double-pixel camera [J]. Physical Review X, 2013, 3: 011013.
- [21] Wiley W C, McLaren I H. Time-of-flight mass spectrometer with improved resolution [J]. Review of Scientific Instruments, 1955, 26(12): 1150-1157.
- [22] Cui Y, Schuon S, Chan D, et al. 3D shape scanning with a time-of-flight camera [C] // 2010 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 13-18, 2010, San Francisco, CA, USA. New York: IEEE Press, 2010: 1173-1180.
- [23] Ganapathi V, Plagemann C, Koller D, et al. Real time motion capture using a single time-of-flight camera [C] // 2010 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 13-18, 2010, San Francisco, CA, USA. New York: IEEE Press, 2010: 755-762.
- [24] Marr D, Poggio T. A computational theory of human stereo vision [J]. Readings in Cognitive Science, 1988: 534-547.
- [25] Lucas B D, Kanade T. An iterative image registration technique with an application to stereo vision [C] // IJCAI'81: Proceedings of the 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence, August 24, 1981, San Francisco, CA, United States. New York: ACM, Inc., 1981, 2: 674-679.
- [26] Sun B, Edgar M P, Bowman R, et al. 3D computational imaging with single-pixel detectors [J]. Science, 2013, 340(6134): 844-847.
- [27] 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.
- [28] Musarra G, Lyons A, Conca E, et al. Non-line-of-sight three-dimensional imaging with a single-pixel camera [J]. Physical Review Applied, 2019, 12: 011002.
- [29] Zhang Z B, Zhong J G. Three-dimensional single-pixel imaging with far fewer measurements than effective image pixels [J]. Optics Letters, 2016, 41(11): 2497-2500.
- [30] Zhang Y W, Edgar M P, Sun B Q, et al. 3D single-pixel video [J]. Journal of Optics, 2016, 18(3): 035203.
- [31] Higham C F, Murray-Smith R, Padgett M J, et al. Deep learning for real-time single-pixel video [J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 2369.
- [32] Gibson G M, Sun B Q, Edgar M P, et al. Real-time imaging of methane gas leaks using a single-pixel camera [J]. Optics Express, 2017, 25(4): 2998-3005.
- [33] Edgar M P, Gibson G M, Bowman R W, et al. Simultaneous real-time visible and infrared video with single-pixel detectors [J]. Scientific Reports, 2015, 5: 10669.
- [34] Radwell N, Mitchell K J, Gibson G M, et al. Single-pixel infrared and visible microscope [J]. Optica, 2014, 1(5): 285-289.
- [35] 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.
- [36] Watts C M, Shrekenhamer D, Montoya J, et al. Terahertz compressive imaging with metamaterial spatial light modulators [J]. Nature Photonics, 2014, 8(8): 605-609.
- [37] Stantchev R I, Sun B Q, Hornett S M, et al. Noninvasive, near-field terahertz imaging of hidden objects using a single-pixel detector [J]. Science Advances, 2016, 2(6): e1600190.
- [38] 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.
- [39] Vallés A, He J H, Ohno S, et al. Broadband high-resolution terahertz single-pixel imaging [J]. *Optics Express*, 2020, 28(20): 28868-28881.
- [40] Stantchev R I, Yu X, Blu T, et al. Real-time terahertz imaging with a single-pixel detector [J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 2535.
- [41] 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.
- [42] Klein Y, Schori A, Dolbnya I P, et al. X-ray computational ghost imaging with single-pixel detector[J]. *Optics Express*, 2019, 27(3): 3284-3293.
- [43] Pelliccia D, Rack A, Scheel M, et al. Erratum: experimental X-ray ghost imaging [J]. *Physical Review Letters*, 2016, 117(21): 219902.
- [44] Greenberg J, Krishnamurthy K, Brady D. Compressive single-pixel snapshot X-ray diffraction imaging[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(1): 111-114.
- [45] Bian L H, Suo J L, Situ G H, et al. Multispectral imaging using a single bucket detector[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 24752.
- [46] Amiot C, Ryzkowski P, Friberg A T, et al. Supercontinuum spectral-domain ghost imaging [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(20): 5025-5028.
- [47] Xiao Y, Zhou L N, Chen W. Direct single-step measurement of hadamard spectrum using single-pixel optical detection [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 31(11): 845-848.
- [48] Tian N, Guo Q, Wang A, et al. Fluorescence ghost imaging with pseudothermal light [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(16): 3302-3304.
- [49] Mizuno T, Iwata T. Hadamard-transform fluorescence-lifetime imaging [J]. *Optics Express*, 2016, 24(8): 8202-8213.
- [50] Ma J W. Single-pixel remote sensing [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2009, 6(2): 199-203.
- [51] 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.
- [52] 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.
- [53] 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.
- [54] Xu Z H, Chen W, Penueles J, et al. 1000 fps computational ghost imaging using LED-based structured illumination[J]. *Optics Express*, 2018, 26(3): 2427-2434.
- [55] 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.
- [56] Garipey G, Krstajić N, Henderson R, et al. Single-photon sensitive light-in-flight imaging [J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 6021.
- [57] 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.
- [58] Clemente P, Durán V, Torres-Company V, et al. Optical encryption based on computational ghost imaging[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(14): 2391-2393.
- [59] 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.
- [60] Jiang S, Wang Y, Long T, et al. Information security scheme based on computational temporal ghost imaging[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 7676.
- [61] Chen W, Chen X D. Ghost imaging for three-dimensional optical security [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103(22): 221106.
- [62] Caramazza P, Bocolini A, Buschek D, et al. Neural network identification of people hidden from view with a single-pixel, single-photon detector [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 11945.
- [63] Hedayat A, Wallis W D. Hadamard matrices and their applications[J]. *The Annals of Statistics*, 1978, 6(6): 1184-1238.
- [64] Yuan J Y, Chen Y Y, Liu Z Z, et al. Correlated imaging with partially coherent light for remote sensing [J]. *Journal of Modern Optics*, 2017, 64(17): 1708-1716.
- [65] He Y H, Zhang A X, Li M F, et al. High-resolution sub-sampling incoherent X-ray imaging with a single-pixel detector [J]. *APL Photonics*, 2020, 5(5): 056102.
- [66] Candès E, Romberg J. Sparsity and incoherence in compressive sampling[J]. *Inverse Problems*, 2007, 23(3): 969-985.
- [67] Candès E J. The restricted isometry property and its implications for compressed sensing [J]. *Comptes Rendus Mathématique*, 2008, 346(9/10): 589-592.
- [68] Baraniuk R, Davenport M, DeVore R, et al. A

- simple proof of the restricted isometry property for random matrices [J]. *Constructive Approximation*, 2008, 28(3): 253-263.
- [69] Jiang S, Li X Y, Zhang Z X, et al. Scan efficiency of structured illumination in iterative single pixel imaging[J]. *Optics Express*, 2019, 27(16): 22499-22507.
- [70] Jiang S. Investigation of signal to noise ratio and application in single-pixel computational imaging [D]. Jinan: Shandong University, 2019: 39-56.
江山. 单像素计算成像的信噪比及其应用研究[D]. 济南: 山东大学, 2019: 39-56.
- [71] 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.
- [72] Khakimov R I, Henson B M, Shin D K, et al. Ghost imaging with atoms[J]. *Nature*, 2016, 540(7631): 100-103.
- [73] He Y H, Huang Y Y, Zeng Z R, et al. Single-pixel imaging with neutrons[J]. *Science Bulletin*, 2021, 66(2): 133-138.
- [74] Li S, Cropp F, Kabra K, et al. Electron ghost imaging [J]. *Physical Review Letters*, 2018, 121(11): 114801.
- [75] 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.
- [76] Wang Y, Liu Y, Suo J, et al. High speed computational ghost imaging via spatial sweeping[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 45325.
- [77] Katz O, Bromberg Y, Silberberg Y. Compressive ghost imaging[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95(13): 131110.