单像素成像中的光信息编码与解码

邓 超[1,2],索津莉[1],张志利[2],戴琼海[1]

(1. 清华大学 自动化系,北京 100084; 2. 西安高科技研究所,陕西 西安 710025)

摘 要:单像素成像旨在通过单个感光元件记录目标场景信息。由于其高灵敏度、宽谱段响应等良好的特性,单像素成像是近年来的研究热点。通过对高维光信号的编码采集与解码重构,单像素成像能够满足丰富的成像需求。介绍了单像素成像的研究背景,简述了其成像原理及重构算法,从光信息编码与解码角度系统回顾了单像素成像的研究现状和前沿技术。此外,还讨论了单像素成像技术中存在的问题,以及未来可能的研究方向与应用。

关键词:单像素成像; 光信息; 编码采集; 解码重构

中图分类号:TN911 **文献标志码**:A **DOI**:10.3788/IRLA201948.0603004

Coding and decoding of optical information in single-pixel imaging

Deng Chao[1,2], Suo Jinli[1], Zhang Zhili[2], Dai Qionghai[1]

(1. Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. High-tech Institute of Xi′an, Xi′an 710025, China)

Abstract: Single-pixel imaging aims to record the target scene information via a single element detector. For its high sensitivity and wide range of spectrum response, single-pixel imaging is attracting a lot of attentions. Based on the coded acquisition and decoded reconstruction of high dimensional optical signal, single-pixel imaging can meet the demanding requirements in some challenging cases. The research background of single-pixel imaging was firstly introduced, and its imaging principle and reconstruction algorithms were briefly described. Then, from the perspective of coding and decoding of optical information, the current researches and advanced technologies were systematically reviewed. Besides, the existing problems in single-pixel imaging, and its future extensions and potential applications were discussed.

Key words: single-pixel imaging; optical information; coded acquisition; decoded reconstruction

收稿日期:2019-01-15; **修订日期**:2019-02-25

基金项目:国家自然科学基金(60277005)

作者简介:邓超(1990-),男,博士生,主要从事计算摄像学方面的研究。Email:deng-c15@mails.tsinghua.edu.cn

导师简介:戴琼海(1964-),男,教授,博士生导师,博士,主要从事计算摄像学方面的研究。Email:qhdai@tsinghua.edu.cn

0 引 言

近年来,核心阵列传感器如 CCD 或者 CMOS 等器件的性能已无法满足复杂环境下的成像要求,如极弱光成像、非视距成像、穿透散射介质成像等。从成像器件和成像方法两个角度寻求新型的成像方案是解决此问题的有效手段。其中,单像素成像是一种高效的成像方案。

顾名思义,所谓单像素成像(SPI),是指利用单个感光器件对物体进行成像的技术。一方面,由于只记录单点光强,单像素探测器的感光面积大大增加,因此,其灵敏度极高;另一方面,不同于阵列传感器只对可见光波段的响应, 单像素探测器可以实现近紫外到远红外,甚至是太赫兹波段的成像。此外,其带宽极大, 协同较高频率的 AD 转换器, 单像素探测器可高达 45 GHz。基于以上这些优点,单像素成像技术引起了广泛的关注。

文中主要从光信息编码与解码两个角度概览单像素成像的发展历程与研究现状, 以及现阶段取得的研究进展。

1 单像素成像研究背景

得益于其巨大的潜力, 单像素成像广泛应用于包括遥感[1-2]、物体追踪[3]、光学加密[4]、荧光成像[5]、3D 重建[6]等领域。实际上,单像素成像又称为鬼成像(GI)。鬼成像起源于基于量子效应而实现的成像机制。1995 年,Pittman 等人[7-8]利用自发参量下转换晶体(SPAD)产生纠缠光源,使用分光镜将其一分为二,分别作为信号光和参考光。其中,信号光与目标场景作用, 参考光直接被符合计数器采集。2002 年, Bennink 等人[9-12]用一对平行光取代纠缠态双光子,也完成了鬼成像实验。这次实验引发了学术界关于鬼成像本质的讨论。本质上,热辐射相关函数的相干性相似于双光子波函数的传播性, 所以经典光场也可实现鬼成像。2005 年, 热光源作为成像光源实现鬼成像,再一次证明了经典光场的可行性[13]。通过利用旋转的毛玻璃获得不相干的赝热光场来模拟真热光场,然后按照 Pittman 等人的方式,通过分光镜产生信号光和参考光, 分别使用延迟的光子探测器和 CCD 进行相应信号的探测,最后使用相关的方法也实现了图像重构。空间光调制器(SLM)的出现进一步推动了鬼成像的发展。2009 年,Yaron Bromberg 等人[14]将预先设定的光照编码直接打在待测物体上,只利用一个单像素探测器即可实现鬼成像, 这种方法被称为计算鬼成像。因此,从光源的角度细分,鬼成像可以归为三类:量子鬼成像,经典鬼成像和计算鬼成像。

在计算摄像领域,2006 年 Dharmpal Takhar 等人[15]利用单像素探测器取代阵列传感器,并结合数字微镜器件(DMD)首次实现单像素成像。他们将此成像系统命名为单像素相机。虽然鬼成像和单像素成像最早出现在不同的研究领域, 但随着各自的发展,学术界意识到这两者本质上是一样的,将其视为一个概念。

2 单像素成像原理及重构算法

单像素成像的光路如图1 所示, 入射光经分光镜分成两束,称之为参考臂和成像臂,参考臂直接被阵列传感器接收,成像臂与目标场景作用后被透镜汇聚到单像素探测器表面。这两束中的任何一束都无法直接对物体成像:对于参考臂来说,阵列传感器采集到的光信号没有物体信息,而对于成像臂来说,由于单像素探测器不具有空间分辨能力,只能探测单点的光强,也无法直接对场景成像。鬼成像中的“鬼”强调的是任何一个探测器(单像素探测器或者阵列传感器)都无法直接“看”到物体,仿佛像幽灵一般。

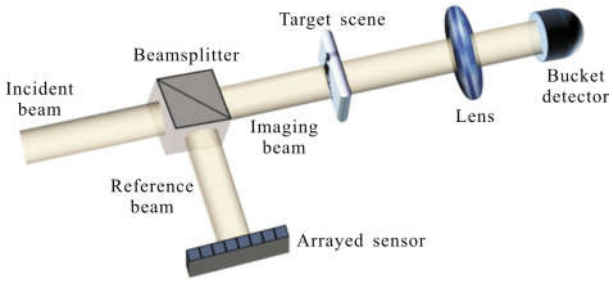

图 1 单像素成像的光路示意图

Fig.1 Optical diagram of single-pixel imaging

单像素成像的原理如图 2 所示, 在采集过程中,一系列光照编码 $I_1, I_2, \cdots, I_n$ 与目标场景 O 作用(Hadamard 乘积),对应生成被编码后的场景。由于单

像素探测器采集的是其靶面的总光强，所以其探测值为编码后场景所有像素的光强总和，分别得到 S_1，S_2，…，S_n。因此，SPI 的成像原理是根据一系列照明编码 I_1，I_2，…，I_n 和对应单像素探测值 S_1，S_2，…，S_n 重建目标场景 O。将目标场景和每个光照编码 I_i 分别写成列向量 O 和 I_i 的形式，单像素的第 i 次探测值 S_i 为：

$$S_i=I_i^{\mathrm{T}}O \tag{1}$$

可以看出，单像素探测值实际上是光照编码在目标场景上的投影大小。

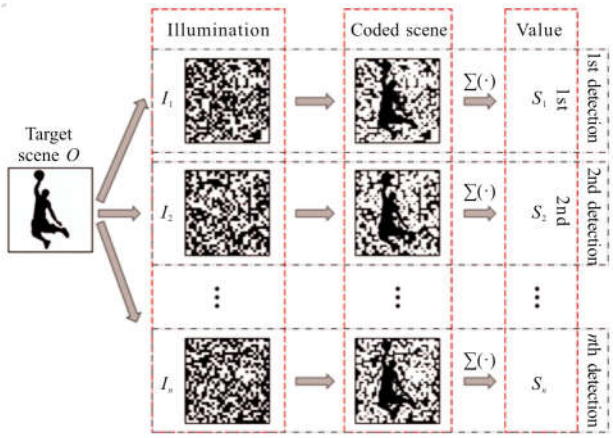

图 2 单像素成像原理

Fig.2 Principle of single-pixel imaging

到目前为止，单像素成像的重建算法分为三大类：线性相关算法[16-19]、交替投影(AP)算法[20-22]以及基于压缩感知(CS)的重建算法[23-24]。

(1) 线性相关算法　线性相关算法是基于单像素探测器和照明编码的二阶或者高阶相关来重建，即：

$$\hat{O}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(S_i-\bar{S})[I(x)-\bar{I}(x)]=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}S_iI_i(x)-\bar{S}\bar{I}(x) \tag{2}$$

式中：x 为 2D 空间坐标；$\bar{S}$为单像素探测值的平均：$\bar{S}=\sum_{i=1}^{n}S_i$；$\bar{I}(x)$为 n 个光照编码在空间上的平均：$\bar{I}(x)=\sum_{i=1}^{n}I_i(x)$。从公式(2)可以看出：单像素重建过程实际上是对所有的光照编码按其投影大小加权后减去直流分量。由于单像素探测值 S_i 是光照编码与目标场景在空间上点乘后所有像素强度之和，即 $S_i=\sum_yO(y)I_i(y)$，因此

$$S_i-\bar{S}=\sum_yO(y)[I_i(y)-\bar{I}(y)] \tag{3}$$

将公式(3)代入公式(2)可得到目标场景的估计值与真实值的关系为：

$$\hat{O}(x)=\sum_yO(y)\cdot\left\{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}[I_i(x)-\bar{I}(x)][I_i(y)-\bar{I}(y)]\right\} \tag{4}$$

式中：$C(x,y)=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}[I_i(x)-\bar{I}(x)][I_i(y)-\bar{I}(y)]$为光照编码的二阶自相关矩阵，表征光照编码本身的属性。若光照编码中每个空间位置的点都是统计上独立同分布的，则 $C(x,y)$具有以下性质：

$$C(x-y)=\begin{cases}\sigma^2, x=y\\ 0, 其他\end{cases} \tag{5}$$

式中：σ^2 为光照编码强度分布的标准协方差。此时，公式(4)变为：

$$\hat{O}(x)=\sigma^2O(x) \tag{6}$$

换句话说，二阶相关算法的重构质量取决于单像素成像的光照编码，只有当其满足独立同分布特性时，才能很好地重构目标场景。在实际成像过程中，基于空间光调制器的单像素成像系统一般使用计算机产生光照编码，这种光照编码是伪随机的，不满足独立同分布特性，所以重建质量不高。只有当测量次数 n 无穷大时，才满足这种特性，而这种情况是不存在的。基于二阶相关算法，有很多学者提出改进算法以提高其性能，比如：差分迭代、正则化迭代、高阶相关等，但效果都不明显。因此，虽然基于线性相关的算法计算量小，但重构质量较差，使用场合较少。

(2) 交替投影算法　交替投影算法最早由参考文献[22]引入单像素领域，其原理是将光照编码和单像素探测值看作目标场景在空域和傅里叶域的约束，通过在这两个空间的交替投影完成重建过程。具体来说，对于第 i 次探测，单像素探测值 S_i 是编码后的场景 $O_{ci}(x)=O(x)I_i(x)$的总光强，写成积分形式：

$$S_i=\int_xO(x)I_i(x)\mathrm{d}x=\int_xO_{ci}(x)\mathrm{d}x \tag{7}$$

另一方面，$O_{ci}(x)$的傅里叶变换可写成：

$$\widetilde{O}_{ci}(\omega)=\int_xO_{ci}(x)\exp(-j2\pi\omega x)\mathrm{d}x \tag{8}$$

在公式(8)两边取 $\omega=0$，得到：

$$\widetilde{O}_{ci}(\omega)|_{\omega=0}=\int_xO_{ci}(x)\mathrm{d}x \tag{9}$$

比较公式(7)和公式(9)可得：

$$S_i=\widetilde{O}_{ci}(\omega)|_{\omega=0} \tag{10}$$

至此,公式(10)建立了单像素探测值 S_i 与编码后场景 $O_{ci}(x)$之间的傅里叶关系:单像素探测值 S_i 是 $O_{ci}(x)$的傅里叶域中心频率的值。基于此,AP 算法将单像素重构问题看成在已知光照编码 $I_i(x)$的情况下对目标场景 $O(x)$ 的估计,以使得 $O(x)I_i(x)$和探测结果 S_i 之间的误差最小。

在单像素成像中, 交替投影算法的迭代过程如下:首先猜测待重建场景的初始值为 $O_g(x)$,一般为全 0、全 1 或者伪随机矩阵,也可利用其他算法的重建结果作为初始值。接着根据 $O_{ci}(x)=O(x)I_i(x)$计算编码后的场景,并将其变换到傅里叶域,基于公式(10)进行更新,即

$$\widetilde{O}_{ci}^{t+1}(\omega)=\widetilde{O}_{ci}^{t}(\omega)[1-\delta(\omega)]+S_i\delta(\omega) \tag{11}$$

式中:t 为第 t 次迭代;$\delta(\cdot)$为脉冲函数。公式(11)的意义在于用单像素的探测值 S_i 来代替 $O_{ci}(\omega)$傅里叶域中心点的值。最后根据下式更新目标场景:

$$O^{t+1}(x)=O^t(x)+\frac{I_i(x)}{\max\{I_i^2(x)\}}[O_{ci}^{t+1}(x)-O^t(x)I_i(x)] \tag{12}$$

重复上述步骤至算法收敛。需要注意的是,AP 算法的一次迭代过程包含所有单像素成像的 n 次探测结果。也就是说,对于第 t 次迭代,i 需要从 1 遍历到 n。

(3) CS 算法 CS 算法将图像先验引入重建过程,以此减小欠定系统的解空间,所需的采样次数较少且收敛较快。受限于限制等距属性[25],CS 对采样矩阵的相关性提出了要求。根据公式(1)可将单像素的成像模型写为矩阵相乘形式:

$$S=I\cdot O \tag{13}$$

式中:$S=[S_1,S_2,\cdots,S_n]^{\mathrm{T}}$;$I=[I_1,I_2,\cdots,I_n]^{\mathrm{T}}$。一般使用梯度域总变分(TV)或者离散余弦变换(DCT)域中的稀疏性作为图像先验,CS 的重建问题可写为:

$$\min_O\|\Psi O\|_1,\ \text{subject to}\ S=I\cdot O \tag{14}$$

式中:Ψ 为目标域的变换矩阵。CS 算法大大降低了单像素成像的探测次数,提高了其成像效率,因此,其在单像素中的应用较为广泛。

3 单像素成像中的光信息编码与解码

作为自然界物理信息的载体,光是一种电磁波。1991 年,Adelson 把光建模为七维全光函数[26],即空间(x,y,z)、角度(θ,φ)、光谱(λ)和时间(t)。单像素成像的本质是对高维光信号的耦合编码采集与解码重构。实际上,编码采集是将目标场景信息在特定的基上进行分解的过程,这就是所谓的编码方式。典型的编码方式包括随机编码、Hadamard 编码和正弦编码等。最常用的是随机编码,随机编码由于具有良好的等距限制属性,一般在压缩感知算法中应用的比较广泛。Hadamard 编码是由 Hadamard 矩阵得到。由于每个元素是 1 或者−1,每个 Hadamard 码需要 DMD 两次编码得到。区别于随机码,Hadamard 码两两正交。正弦编码由于能够调制场景的频域而广泛应用于傅里叶单像素成像中。相应的,解码一般分为傅里叶域解码、基于压缩感知的解码算法、交替投影算法解码和基于深度学习的解码算法等几种方式。傅里叶域解码的理论基础是自然场景在空间频域的稀疏性,其运算成本极低,只需要基本代数运算即可。基于压缩感知的解码算法中, 常用的图像先验有梯度域总变分、离散余弦变换、加权−$\ell_{2,1}$ 范数和稀疏先验等。

3.1 二维平面单像素成像

单像素成像中, 对不同维度光信息的获取决定了不同的编码方式和解码算法。最典型的单像素技术即是二维空间平面的单像素成像[27-31]。这方面的研究较多,主要集中在多尺度自适应、互补成像等技术,这些技术旨在减少采样数,节省采样资源,提高单像素成像的速度和成像质量,做到实时动态采集。多尺度自适应技术是指根据图像的某些特征, 如自然图像在某些域(小波域,傅里叶域等)的时空稀疏性,根据已采集的数据结果,自适应地得到后续的光照编码, 最后只对较大的系数进行采集而略去接近于零的系数。这一方法极大的减少了采样的次数,提高了成像速度。压缩感知算法虽然也能减小采样数,但不考虑光照编码的必要性, 所以需要极大的计算机开销, 成像时间随着图像像素数的增加而成几何级增长,大大拖慢了成像速度。

自适应技术一般基于小波域, 利用多级小波变换所得系数的稀疏性,预先设定阀值,自适应地选择光照编码。 Soldevila 等人[32]利用多级小波变换后小波系数的稀疏性, 只对高分辨率的区域投射高分辨的光照编码,其他区域投射低分辨率的光照编码,同时不需要先验信息,减小了采样数目,最后利用小波逆变换恢复图像,减小了计算机开销,大大增加了成像速度。为了验证这一想法, 他们实现了对一幅

128×128 的图像 3 Hz 速度的采集(~8 000 次测量,采样速度是 22.7 kHz),在没有增加计算机开销的基础上,采样率只有 50%。尽管相比于之前的自适应单像素成像性能有了很大的提升,比如不需要任何先验知识而是自适应地根据不同部分的场景信息来调节所需光照编码,但 3 Hz 的速率显然和“实时”还相差甚远,将场景采集速度受制于调制器件是一个不明智的决定,自适应压缩成像的速度受制于空间光调制器的性能,而且自适应的机理显得较为初级,虽然信噪比较之以往有了提升但有限,没有从根本上解决采集速度慢和信噪比低的问题。

互补单像素技术是利用两个单像素探测器同时接收 DMD 输出端,充分利用所有与物体接触的光子,消除环境光的影响,提高帧率和系统的信噪比[33]。由于不需要先验信息和后续计算机处理,增加了成像速度。对环境光的免疫使得互补技术可以在极弱光、散射介质中发挥重要作用。F. Soldevila 等人对分辨率为 64×64 的图像进行了 5 Hz 的动态采集,如果使用压缩感知等技术,可实现 25 Hz 的帧率。由于对 DMD 反射的两路光场都进行了采集,互补单像素技术充分利用了来自样本的所有光线,可以使采集速率提高两倍,而且抵消了环境光的干扰,提高信噪比。虽然互补单像素技术在一定程度上能抵消环境噪音的影响,但消除不了光照强度和探测器波动带来的误差,因此,信噪比的提升是有限的。再者,采集速度只能提升两倍,没有彻底解决由于多次采样带来的成像速度慢的问题,

加上带宽限制,虽然做到了动态成像,但分辨率受限。

3.2 时域单像素成像

光的传播在空间上和时间上是具有二重性的,即空域光的衍射就相当于时域光的色散,这是时域单像素成像的理论基础。时域单像素成像是典型单像素成像向一维的延伸。在此过程中,二维编码光照变成一维时域编码;二维物体转变成一维时域物体。通过多次扫描,根据时域编码和单像素探测器的测量值即可恢复该时域物体。时域单像素探测器可以用积分时间较长的探测器代替,而时间分辨率较高的探测器则用来检测时域编码。

Ryczkowski 等人[34]完成了对时间分辨率约为 50 ps 强度波动的波形检测与恢复,时域“像素数”为 36,需要的时域编码数到 80 000 个才能得到较为满意的恢复效果。由此可见,相比于空域单像素,时域单像素需要更多的采样才能成像,采样效率极度低下。时域单像素技术对时域物体后端的时间扰动不敏感,可以对荧光寿命检测,一维超快波形的动态成像等瞬态不重复的信号进行精确检测与恢复,而不需要成本昂贵的高精度探测仪。该方法时间分辨率不够高,随着扫描次数的降低,信噪比大大减小。Ryczkowski 等人的工作具有开拓性的意义,首次将单像素成像延伸到时域,但距离实用还有很长一段路要走,这是因为时域单像素成像所需采样数远远大于时域“像素数”,严重影响了成像速度。

3.3 三维立体动态单像素成像

三维立体单像素成像有三种实现方式:基于光度立体技术、基于飞行时间(Time of Flight,TOF)技术以及基于全息技术。光度立体[35-36]是一种重建三维表面的方法,利用不同光照条件下拍摄的多幅图像计算表明法向量,基于高度的全局优化和局部特征保持的基础上,通过金字塔式多尺度逼近,由表面法向量恢复三维表面信息。在单像素成像光路中,单像素探测器就等价于光源。因此,将不同位置的光源用单像素探测器代替即可完成单像素三维立体成像。

Sun 等人[37]使用包含四个单像素探测器的光路进行三维立体成像,四个单像素探测器对应于四个不同位置的光源,用于产生随机光照编码的投影仪则相当于 CCD 相机,因此,每个单像素探测器的计算鬼成像采集就相当于不同光照、同一视角的图像的采集。该方法与传统的光度立体方法的不同之处在于,光度立体需要对 CCD 相机进行时间上的复用,即进行一次成像的时候仅使一个光源发光,通过一次使不同的光源发光得到不同光照角度下的物体的成像,最后还需要进行像素对齐工作,而该工作中的方法是同时对该物体的成像进行采集。该方法成本低,可向其他光谱维度延伸,但是采样次数太多,做不到动态成像,光效率太低,光谱维信息没有充分利用。多次采样引入的噪音在一定程度上影响了成像质量,并大大减慢成像速度,因此,只能做到静态成像,而无法恢复动态场景。

第二种方法是将单像素与 TOF 技术相结合[38-39],充分利用单像素探测器对光探测的敏感性,完成场景灰度值和深度的测量。Sun 等人[40]实现了帧率达到

12 Hz 的动态采集。其中的单像素探测器具有深度解析的能力，其核心器件为时间相关单像素调制器(TCSPC),在对光子计数的基础上可以进一步通过与经脉冲调制的发射端的时间相关获取每个光子的TOF。使用 Hadamard 编码及其反编码,两者差分信号作为输入,以抵消环境光影响。单像素接收的不同时间段的信号表示不同深度信息，以此恢复三维立体场景。该方法在 5 m 的距离上重建 128×128 分辨率的三维图像,精度为 3 mm 左右。利用单像素调制器虽然实现了三维动态采集,但成本较高,数据量太大,处理起来较为困难。

第三种方法是将单像素技术与全息技术结合完成对样本的单像素计算全息成像[27]。在相移全息成像 Mach-Zehnder 干涉仪的基础上,增加了利用空间光调制器调制光路的部分,以实现单像素采集功能。通过在相移分别为 0,π/2 和 π 的时候，对样本进行单像素成像采集,但是在对成像进行恢复的步骤,区别于仅对样本的幅值进行成像的方法，该工作利用单像素在不同相移下的成像的幅值，可以得到相应的幅值和相位,即单次测量值变为：

$$S_i=(I_{i,0}-I_{i,\pi})/4+j(2I_{i,\pi/2}-I_{i,0}-I_{i,\pi})/4 \tag{15}$$

式中：$I_{i,0}$,$I_{i,\pi/2}$,$I_{i,\pi}$ 分别为相移为 $\varphi=0,\pi/2,\pi$ 时,单像素相应的输出值。该工作利用压缩感知算法恢复样本的幅值和相位,与传统方法的不同之处在于,该方法需要利用的稀疏性为样本的幅值的稀疏性。

3.4 光谱维度单像素成像

不同于传统阵列式传感器，单像素探测器的动态范围大,响应谱段宽,对不同频率的光均具有较强的敏感性，从近紫外到远红外再到 X 射线甚至太赫兹都有相当敏感的响应。基于此,单像素成像技术在光谱维成像有着巨大的潜力。

太赫兹波段是指频率在 300 GHz~10 THz(波长 1 mm~3 μm)的电磁波,被称为“太赫兹缺口”,这是因为这一波段没有合适的材料作为成像传感器件。太赫兹波段成像应用领域十分广泛，能给通信、雷达、电子对抗、电磁武器,天文学、医学成像、无损检测、安全检查 (生化物检查) 等领域带来深远影响。Watt 等人[41-42]利用特制的超材料空间光调制器和单像素探测器实现了太赫兹波段的单像素成像。他们特制的偏振敏感超材料空间光调制器可以在太赫兹光源强度很低的情况下实现低噪声、高保真度多重成像,进而实现太赫兹动态成像。

X 射线是由于原子中的电子在能量相差悬殊的两个能级之间的跃迁而产生的粒子流，波长介于紫外线和 γ 射线之间，在 0.01~100 Å (1 Å=0.1 nm)之间。X 射线具有很高的穿透本领,多用于医学成像诊断和 X 射线结晶学。Greenberg 等人[43]在物体后端放一个亚像素间隔的编码光圈，通过后端单像素的探测即可完成物体材料和深度两个维度的辨识，此工作将单像素技术推广到 X 射线谱段，进一步推动了单像素技术的发展。

在红外谱段,结合单像素技术可以实现夜视、气体感知和医疗诊断等技术[44]。Edgar 等人[45]实现了单像素动态近红外成像,最大帧率能达到 10 Hz。传统红外阵列传感器造价昂贵 (一个近红外多光谱探测仪需要至少 50 000 美元),而且有一定的局限,例如微辐射热计阵列传感器需要冷却以提高灵敏度,低分辨率肖特基二极管阵列需要扫描才能成像等,单像素探测器完全可以克服上述缺点，有望完全取代传统红外探测器。

可见光波段谱成像应用十分广泛[46-48],可以为植被生态、海洋海岸水色、冰雪、土壤等大气研究所用。传统多光谱成像仪造价十分昂贵,而且光效率很低,一般采用色散光学器件(如棱镜或者衍射光栅等),或者窄带滤波来分开不同波段，最后利用阵列式传感器分别记录光强。单像素成像技术提供了一个全新的思路来获取多光谱数据，清华大学的戴琼海课题组的 Bian 等人[49]利用单像素调制速度远大于光学调制器件(如空间光调制器)这一特点,将光谱信息编码到这一段时间差内，利用频分复用的方式将不同的波长以不同的主频调制在一起，最后利用傅里叶反变换进行解码，得到了 450~650 nm 共 10个波段的光谱图像(图像分辨率为 64×64)。基于自然场景的光谱维冗余性,戴琼海课题组的 Wang 等人[50]利用单像素探测器结合色轮，完成了高精度的高光谱成像,进一步推动了单像素成像技术在光谱维的发展。Liu 等人[51]完成了基于随机调制单像素技术的多光谱成像实验,该技术利用 2D 探测器实现 3D 光谱数据集的单曝光获取，以远低于奈奎斯特采样的频率获得数据信息，大大提高了光谱相机的性能和光效率。他们还从信息论的角度解释了成像系统的信息传递过程,他们认为,相比于传统相机,基于单像素技术

的单曝光光谱相机有着更高的信息获取效率。

3.5 超快成像

在研究超快动态现象诸如冲击波、细胞内化学反应、神经活动、激光诊断和微流体等流域,超快实时成像是一个必不可少的工具。传统阵列式传感器无论是高灵敏度、高分辨率的 CCD,还是 CMOS,虽然具备捕捉超快过程的能力,但受制于读出速率、帧率有限。不仅如此,对于传统阵列式传感器,帧率和灵敏度是一对不可调和的矛盾, 只能采取折中的手段。利用灵敏度极高的单像素传感器可以完美解决这一问题。

Goda 等人[52]实现了帧率高达 6.1 MHz、快门速度达到 440 ps 的超快成像,比传统传感器快 1 000倍。他们用 2D 色散装置将锁模飞秒激光脉冲按波长映射到一个二维平面, 然后与物体发生作用后重新进入色散装置,变成激光脉冲,此时物体的信息已经被编码到波长中, 再经过光学放大色散傅里叶变换装置进行解码 (即每个谱段在时间维度的分开)。该实验的本质是采用空间-波长-时间的一个映射, 将物体的空间信息编码到不同的波长上,实现波分复用,最后利用单像素探测器超高的调制频率将波长信息从时间上进行解码,获得相应的物体空间二维信息。

3.6 极弱光成像

极弱光成像在生物成像、显微等领域,极弱光成像扮演着重要作用。由于生物组织细胞的大小与半波长在一个数量级, 光在其中的传播主要以波动光学为主。光子受组织细胞的散射作用,随着深度的增加,光强越来越低,导致探测器无法探测到这些仅存的光子。不仅如此,在微米尺度上,被散射的光子互相干涉,形成散斑,严重干扰探测。波前整形、时间反转、散斑相关和传输矩阵等技术可以一定程度上消除散斑的影响。增加探测器的灵敏度也可以在一定程度上提高系统性能, 利用单像素探测器的超高灵敏度可以实现在极弱光环境下的成像。

Morris 等人[53]研究了极弱光条件下成像结果,利用单光子雪崩探测器来触发增强型 CCD(ICCD)的方式, 或者 ICCD 内部触发方式来对接收光子计数。采用三种方式进行成像:SPAD 放置在物体后端端来触发 ICCD, ICCD 放置在物体后端同样受 SPAD 触发以及 ICCD 同样放置在物体后端但采取内部触发方式。前两种触发方式所成图像对比度较高,且所用总光子数相同,但第一种比第二种触发的次数少。第三种由于采用内部触发方式,所以成像质量最差。以上结果表明,在同样光子数的条件下,单像素成像比其他任何方式成像质量高,对 CCD 技术要求低。因此,单像素技术在生物成像、显微等方面具有很大的潜在价值

3.7 抗散射成像

传统的基于毛玻璃的抗散射方式有两种:第一,利用毛玻璃旋转记忆效应将毛玻璃看成一个透镜,求出 PSF,进而恢复出原物体;第二,利用散斑的不相关求出样本的频谱, 进而利用相位恢复算法求得原物体。无论第一还是第二种,都是采用 CCD 作为探测器单像素成像利用光场的二阶相关来获取图像,由于单像素探测器只接收物体后端总光强,所以对物体后端的扰动不敏感[54-57],而只对之前的扰动敏感。基于此原理,Gong 等人将物体前后端都放置散射介质, 研究前后不同散射距离对成像质量的影响,由实验结果可知,单像素成像技术对物体后端到探测器之间的散射不敏感,传统成像对物体到 CCD 之间的散射较为敏感, 如果将单像素探测器换成 CCD,则可以大大提高成像质量。根据上面的分析,在单像素成像光路中如果将单像素探测器用 CCD 替代,则可以大大提高光路抗散射能力。

3.8 拐角成像

拐角成像是指在探测器没有"直视"物体的情形下对物体进行成像[58]。传统的阵列式传感器拐角成像方法:(1) 光的反弹模型, 在已知物体外形的情况下, 通过最小化接收光强的方法求出物体的运动轨迹(移动或者旋转);(2) 将反射物(如墙壁)看成散射介质, 利用(1)的方法求出物体。这两种方法均是采用 CCD 探测器。利用单像素探测器也能进行拐角成像,Zhang 等人完成了单像素的抗散射成像和拐角成像[59],该实验还首次实现了利用正弦编码获得图像的傅里叶谱,然后由傅里叶逆变换恢复原图像。该方法充分利用单像素成像后端抗散射原理, 实现拐角成像和抗散射成像, 只用了 12 004 次采样就重建了 245×245 分辨率的图像,采样率不到 20%,信噪比也明显高于空域单像素成像。由于需要采集傅里叶系数,且利用压缩感知算法,所以对计算机量的要求

较大,恢复动态场景较为困难。

3.9 显微成像

显微镜的发明具有划时代的意义,在生命科学、生物学等领域扮演着重要作用。显微镜有放大倍数和分辨率两个基本指标,放大倍数体现显微镜扩大观测物体和区域的能力;分辨率体现分辨细微物体的能力。放大率可以通过一系列放大镜或依据不同种类显微镜来实现,而分辨率则由物镜的数值孔径决定。从发明至今,显微镜性能已经突飞猛进,现已实现了突破衍射极限的分辨率成像,包括基于单分子定位的 PALM 和 STORM[60],基于点扫描法的 STED[61],以及基于计算光照的 SIM[62]。在显微领域,视场和分辨率是一对矛盾,如何解决这对矛盾来实现宽视场、高分辨的采集是显微领域的一大难题。一种方法是在空间域进行分视场采集,另一种是通过变化光照以实现不同频率分量的单独采集,并使用计算成像恢复高分辨率成像。SIM 即是利用空间域不同光照,将图像原频谱在频率域进行搬移以获取高频成分,通过线性方法可以获取高于两个数量级的显微成像。傅里叶叠层显微成像技术(FPM)[63]则是使用不同方向,即不同空间分辨率的光照,采集样本不同空间频率的空间域图像,并在频率域对所获得的频率信息进行处理与合成,对图像进行计算超分辨成像,实现宽视场、高分辨率成像。

单像素成像作为一种有效的成像手段,在显微等应用领域潜力很大[64-65]。传统显微成像由于过高的光强容易造成样本损伤,而单像素成像可以在极弱光条件下完成重建,此外,可以结合前述单像素光谱成像技术完成对光谱的采集。单像素成像技术在显微中的应用主要有两方面的优势:第一,抗散射。由于单像素技术对成像样本后端的扰动具有抗散射作用,只要知道作用于样本面的光照编码,就可准确恢复样本,这是其他方法无可比拟的,因此将单像素技术和双光子、光片等技术结合,可推动显微技术的进一步发展。第二,极弱光成像。由于组织细胞都在光的半波长数量级上,因此,光的波动光学在显微成像上占主导作用。随着穿透深度的增加,非散射光子成几何级衰减,大量光子被散射,对光电探测器提出了严苛的要求,而单像素探测器由于具有光子计数能力,可发挥至关重要的作用。

4 存在的问题

如前所述,单像素成像的原理是关联参考臂和成像臂的信号,完成场景重建。在成像过程中,需要对场景生成一系列的光照编码,单像素每次探测的信号是特定光照编码在场景空间信息上的投影,称为相关测量。不同于阵列传感器的单次拍摄,由于需要多次探测,其成像时间较长。基于此,目前单像素成像主要有以下两方面缺点。

(1) 成像质量较差。在单像素成像过程中,系统的漂移和噪音都是影响成像结果的重要因素,导致多次采样过程中光强、环境光等不变因素产生探测差异,这对最终的成像结果产生较大影响。

(2) 成像速度较慢。单像素成像由于需要多次采样,采样次数大致等于图像像素数,这从原理上浪费了大量时间,不利于动态场景的成像。利用现有调制器件对光路调制速度有限,无法从本质上提高单像素成像速度。

清华大学的宽带数字媒体实验室从编码方案和重构算法两个角度出发,提出了一种基于空-波并行编码的单曝光单像素成像方案[66-67],首次实现了单像素成像的单曝光采集与高质量重建。具体而言,在编码采集过程中,采用空间编码和波长编码相结合的并行编码方案:空间编码用于空域耦合,波长编码实现多次采样;在解码重构过程中,充分利用自然图像局部结构在其低维本征空间的稀疏性,建立了全局先验和局部先验相结合的优化模型,提出了一种基于卷积稀疏编码的单像素优化算法。该方案尽管在一定程度上提升了单像素成像的性能,但成像分辨率较低(16 pixel×16 pixel),且只能实现灰度场景的重建。

因此,单像素成像技术虽然潜力巨大,但要落地实用,仍有很长的一段路要走。

5 结 论

到目前为止,单像素成像技术取得了一定的进展。相比于传统阵列式的成像方式,单像素技术存在以下三个方面的优势:第一,可见光波段外的成像。由于传统阵列传感器在可见光波段之外成本较为昂贵,因此,基于单像素成像框架的成像方案值得进一

步研究。第二,超高速成像。单像素探测器采样速度极高,在瞬态场景的成像中可以发挥巨大的作用。例如生物应用中的荧光寿命检测以及自动驾驶中的基于三维场景重建的雷达系统。第三,多模态成像。对于多模态光信号的获取，在光路中可以通过增加单像素探测器的方式实现。利用不同模态光信号之间的相关性,其编码模型与解码算法可进一步优化,从而提升其重建精度。此外,基于高维光信号冗余机制的探索，研究新型单像素重构算法也是一个值得研究的方向。

参考文献:

[1] Zhao C, Gong W, Chen M, et al. Ghost imaging lidar via sparsity constraints [J]. ***Appl Phys Lett***, 2012, 101(14): 141123.

[2] Meyers R E, Deacon K S, Shih Y. Turbulence-free ghost imaging[J]. ***Appl Phys Lett***, 2011, 98(11): 111115.

[3] Magana-Loaiza O S, Howland G A, Malik M, et al. Compressive object trackingusing entangled photons[J]. ***Appl Phys Lett***, 2013, 102(23): 231104.

[4] Clemente P, Durán V, Tajahuerce E, et al. Optical encryption based on computational ghost imaging[J]. ***Opt Lett***, 2010, 35(14): 2391-2393.

[5] Tian N, Guo Q, Wang A, et al. Fluorescence ghost imaging with pseudothermallight [J]. ***Optics Letters***, 2011, 36(16): 3302-3304.

[6] Sun B, Edgar M P, Bowman R, et al. 3D computational imaging with single-pixeldetectors [J]. ***Science***, 2013, 340(6134): 844-847.

[7] Pittman T, Shih Y, Strekalov D, et al. Optical imaging by means of two-photonquantum entanglement [J]. ***Phys Rev A***, 1995, 52(5): R3429.

[8] Strekalov D, Sergienko A, Klyshko D, et al. Observation of two-photon "ghost"interference and diffraction [J]. ***Phys Rev Lett***, 1995, 74(18): 3600.

[9] Bennink R S, Bentley S J, Boyd R W. "Two-photon" coincidence imaging witha classical source [J]. ***Phys Rev Lett***, 2002, 89(11): 113601.

[10] Valencia A, Scarcelli G, D′Angelo M, et al. Two-photon imaging with thermallight [J]. ***Phys Rev Lett***, 2005, 94(6): 063601.

[11] GattiA, Brambilla E, Bache M, et al. Ghost imaging with thermal light:comparing entanglement and classicalcorrelation [J]. ***Phys Rev Lett***, 2004, 93(9): 093602.

[12] Zhang D, Zhai Y H, Wu L A, et al. Correlated two-photon imaging with truethermal light [J]. ***Opt Lett***, 2005, 30(18): 2354-2356.

[13] Ferri F, Magatti D, Gatti A, et al. High-resolution ghost image and ghostdiffraction experiments with thermal light[J]. ***Physical Review Letters***, 2005, 94(18): 183602.

[14] Shapiro J H. Computational ghost imaging [J]. ***Phys Rev A***, 2008, 78(6): 061802.

[15] Takhar D, Laska J N, Wakin M B, et al. A new compressive imaging cameraarchitecture using optical-domain compression [C]//Computational Imaging IV, 2006, 6065: 606509.

[16] Bromberg Y, Katz O, Silberberg Y. Ghost imaging with a single detector[J]. ***Physical Review A***, 2009, 79(5): 053840.

[17] Gong W, Han S. A method to improve the visibility of ghost images obtained by thermal light [J]. ***Physics Letters A***, 2010, 374(8): 1005-1008.

[18] Ferri F, Magatti D, Lugiato L A, et al. Differential ghost imaging[J]. ***Physical Review Letters***, 2010, 104(25): 253603.

[19] Sun B, Welsh S S, Edgar M P, et al. Normalized ghost imaging[J]. ***Optics Express***, 2012, 20(15): 16892-16901.

[20] Deng C, Suo J, Wang Y, et al. Single-shot thermal ghost imaging usingwavelength-division multiplexing[J]. ***Appl Phys Lett***, 2018, 112(5): 051107.

[21] Guo K, Jiang S, Zheng G. Multilayer fluorescence imaging on a single-pixeldetector [J]. ***Biomed Opt Express***, 2016, 7(7): 2425-2431.

[22] Wang W, Hu X, Liu J, et al. Gerchberg-Saxton-like ghost imaging[J]. ***Optics Express***, 2015, 23(22): 28416-28422.

[23] Katz O, Bromberg Y, Silberberg Y. Compressive ghost imaging[J]. ***Appl Phys Lett***, 2009, 95(13): 131110.

[24] Aβmann M, Bayer M. Compressive adaptive computational ghost imaging[J]. ***Scientific Reports***, 2013, 3: 1545.

[25] Candès E J, Wakin M B. An introduction to compressive sampling [J]. ***IEEE Signal Processing Magazine***, 2008, 25(2): 21-30.

[26] Adelson E H, Bergen J R. The plenoptic function and the elements of early vision[J]. ***Computational Models of Visual Processing***, 1991: 3-20.

[27] Clemente P, Durán V, Tajahuerce E, et al. Compressive holography with a single-pixel detector [J]. ***Optics Letters***, 2013, 38(14): 2524-2527.

[28] Kandjani S A, Kheradmand R, Dadashzadeh N. Ghost imaging with pseudo-thermal light [C]//2011 13th International

Conference on Transparent Optical Networks. IEEE, 2011: 1-4.

[29] Durán V, Clemente P, Fernández-Alonso M, et al. Single-pixel polarimetric imaging [J]. ***Optics Letters***, 2012, 37(5): 824-826.

[30] Soldevila F, Irles E, Durán V, et al. Single-pixel polarimetric imaging spectrometer by compressive sensing [J]. ***Applied Physics B***, 2013, 113(4): 551-558.

[31] 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.

[32] Soldevila F, Salvador-Balaguer E, Clemente P, et al. High-resolution adaptive imaging with a single photodiode [J]. ***Scientific Reports***, 2015, 5: 14300.

[33] Yu W K, Liu X F, Yao X R, et al. Complementary compressive imaging for the telescopic system [J]. ***Scientific Reports***, 2014, 4: 5834.

[34] Ryczkowski P, Barbier M, Friberg A T, et al. Ghost imaging in the time domain[J]. ***Nature Photonics***, 2016, 10(3): 167.

[35] Ikeuchi K. Determining surface orientations of specular surfaces by using the photometric stereo method [J]. ***IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence***, 1981 (6): 661-669.

[36] Woodham R J. Photometric stereo: A reflectance map technique for determining surface orientation from image intensity [C]//Image Understanding Systems and Industrial Applications I, 1979, 155: 136-144.

[37] Sun B, Edgar M P, Bowman R, et al. 3D computational imaging with single-pixel detectors [J]. ***Science***, 2013, 340 (6134): 844-847.

[38] Abramson N. Light-in-flight recording by holography [J]. ***Optics Letters***, 1978, 3(4): 121-123.

[39] Heide F, Hullin M B, Gregson J, et al. Low-budget transient imaging using photonic mixer devices[J]. ***ACM Transactions on Graphics (ToG)***, 2013, 32(4): 45.

[40] 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.

[41] 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.

[42] 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.

[43] Greenberg J, Krishnamurthy K, Brady D. Compressive single-pixel snapshot x-ray diffraction imaging [J]. ***Optics Letters***, 2014, 39(1): 111-114.

[44] Radwell N, Mitchell K J, Gibson G M, et al. Single-pixel infrared and visible microscope[J]. ***Optica***, 2014, 1(5): 285-289.

[45] 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.

[46] 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.

[47] Liu X F, Chen X H, Yao X R, et al. Lensless ghost imaging with sunlight[J]. ***Optics Letters***, 2014, 39(8): 2314-2317.

[48] Duan D, Du S, Xia Y. Multiwavelength ghost imaging [J]. ***Physical Review A***, 2013, 88(5): 053842.

[49] Bian L, Suo J, Situ G, et al. Multispectral imaging using a single bucket detector[J]. ***Scientific Reports***, 2016(6): 24752.

[50] Wang Y, Suo J, Fan J, et al. Hyperspectral computational ghost imaging via temporal multiplexing[J]. ***IEEE Photonics Technology Letters***, 2016, 28(3): 288-291.

[51] Liu Z, Tan S, Wu J, et al. Spectral camera based on ghost imaging via sparsity constraints [J]. ***Scientific Reports***, 2016 (6): 25718.

[52] Goda K, Tsia K, Jalali B. Serial time-encoded amplified imaging for real-timeobservation of fast dynamic phenomena [J]. ***Nature***, 2009, 458(7242):1145.

[53] 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.

[54] Tajahuerce E, Durán V, Clemente P, et al. Image transmission through dynamic scattering media by single-pixel photodetection[J]. ***Optics Express***, 2014, 22(14): 16945-16955.

[55] Meyers R E, Deacon K S, Shih Y. Turbulence-free ghost imaging[J]. ***Applied Physics Letters***, 2011, 98(11): 111115.

[56] Zerom P, Shi Z, O´Sullivan M N, et al. Thermal ghost imaging with averaged speckle patterns [J]. ***Physical Review A***, 2012, 86(6): 063817.

[57] Dixon P B, Howland G A, Chan K W C, et al. Quantum ghost imaging through turbulence [J]. ***Physical Review A***, 2011, 83(5): 051803.

[58] Magana-Loaiza O S, Howland G A, Malik M, et al. Compressive object tracking using entangled photons [J]. ***Applied Physics Letters***, 2013, 102(23): 231104.

[59] Zhang Z, Ma X, Zhong J. Single-pixel imaging by means of Fourier spectrum acquisition [J]. ***Nature Communications***, 2015(6): 6225.

[60] Henriques R, Griffiths C, Hesper Rego E, et al. PALM and STORM: Unlocking live-cell super-resolution [J]. ***Biopolymers***, 2011, 95(5): 322-331.

[61] Willig K I, Rizzoli S O, Westphal V, et al. STED microscopy reveals that synaptotagmin remains clustered after synaptic vesicle exocytosis[J]. ***Nature***, 2006, 440(7086): 935.

[62] Kner P, Chhun B B, Griffis E R, et al. Super-resolution video microscopy of live cells by structured illumination[J]. ***Nature Methods***, 2009, 6(5): 339.

[63] Zheng G, Horstmeyer R, Yang C. Wide-field, high-resolution Fourier ptychographic microscopy [J]. ***Nature Photonics***, 2013, 7(9): 739.

[64] Ghanbari-Ghalehjoughi H, Ahmadi-Kandjani S, Eslami M. High quality computational ghost imaging using multi-fluorescent screen[J]. ***JOSA A***, 2015, 32(2): 323-328.

[65] Pian Q, Yao R, Zhao L, et al. Hyperspectral time-resolved wide-field fluorescence molecular tomography based on structured light and single-pixel detection [J]. ***Optics Letters***, 2015, 40(3): 431-434.

[66] Deng C, Suo J, Wang Y, et al. Single-shot thermal ghost imaging usingwavelength-division multiplexing [J]. ***Applied Physics Letters***, 2018, 112(5): 051107.

[67] Deng C, Hu X, Li X, et al. High fidelity single-pixel imaging[J]. ***IEEE Photonics Journal***, 2019, 11(2): 1.