

动态单像素成像

俞文凯^{1,2*}, 唐菲遥³, 王硕飞^{1,2}, 魏宁^{1,2}

¹北京理工大学物理学院, 北京 100081;

²北京理工大学先进光电量子设计与测量教育部重点实验室, 北京 100081;

³北京理工大学计算机学院, 北京 100081

摘要 单像素成像借助多次掩模调制和单像素测量值计算获得目标物体的多维光场信息,其降维亚采样、高灵敏探测、谱型适应性等特点为非可见波段成像、极弱光探测、激光雷达等领域带来了福音。当面向动态场景时,单运动帧内多次单像素测量与物体的运动之间存在矛盾,引发图像模糊和噪声问题。针对上述问题,介绍了单像素成像的数学模型及其成像机理,综述了动态单像素成像的发展历程及应用现状,尤其是研究人员在提高成像帧频、改进成像方案或者成像机理方面取得的长足进展;讨论了动态单像素成像目前存在的问题,思考和展望了未来的发展趋势,以期为该领域进一步的科学研究提供有益参考。

关键词 成像系统; 计算成像; 图像检测系统; 成像理论; 图像重建技术

中图分类号 TN911.73

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1011013

Dynamic Single-Pixel Imaging

Yu Wenkai^{1,2*}, Tang Feiyao³, Wang Shuofei^{1,2}, Wei Ning^{1,2}

¹School of Physics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

²Key Laboratory of Advanced Optoelectronic Quantum Architecture and Measurement of Ministry of Education, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

³School of Computer Science & Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract Single-pixel imaging uses multiple pattern modulation and calculation of single-pixel measurement values to obtain the multi-dimensional light field information of the target object. Its characteristics such as dimension reduction sub-sampling, high-sensitivity detection, and spectral adaptability brought good news for non-visible band imaging, extremely weak light detection, lidar, and other fields. For a dynamic scene, multiple single-pixel measurements in a single motion frame contradict the motion of the object, causing image blur and noise problems. Aiming at the above problems, the mathematical model of single-pixel imaging and its imaging mechanism are introduced, and the development history and application status of dynamic single-pixel imaging are reviewed, especially the achievements that researchers have made in increasing the imaging frame rate and improving imaging schemes or imaging mechanisms. The current problems of dynamic single-pixel imaging are discussed, and the future development trend is considered and prospected, so as to provide a useful reference for further scientific research in this field.

Key words imaging systems; computational imaging; image detection systems; imaging theory; image reconstruction technique

OCIS codes 110.1758; 110.2970; 110.2990; 170.3010

收稿日期: 2021-02-01; 修回日期: 2021-04-20; 录用日期: 2021-04-28

基金项目: 国家自然科学基金(61801022)、国家重点研发计划(2016YFE0131500)、民用航天项目(D040301)

* E-mail: yuwenkai@bit.edu.cn

1 引言

单像素成像(SPI)是指利用多次单像素测量来获取物光场的高维信息(包括空间三维信息、波长、时间、偏振、光线入射人眼的水平夹角和垂直角在内的共计 8 维光场信息中任意维度组合)。因此,只要是使用到单像素探测或桶探测来获取图像信息的方法,无论采用逐点扫描还是计算的方式,均可称之为单像素成像,例如经典的针孔成像、电视机显像^[1]、激光点扫描成像、Hadamard 成像^[2-3]、Fourier 成像^[4]均可划入单像素成像范畴。其实,单像素成像这一名词最早是在 2008 年由美国莱斯大学的 Baraniuk 研究组提出^[5],单像素成像结合了知名的压缩感知(CS)理论^[6],即假设图像稀疏或可用某个域下的压缩表示,可从测量数远小于待测图像像素数的单像素测量数据中重建出原始图像,该采样也被称为亚(下)采样,这是单像素成像机理与压缩感知理论相结合的最早实例。从字面上来看,单像素成像更多描述的是利用单像素测量来获取图像信息这一成像机理,并不存在算法上的排他性,可采用计算成像技术^[7]中的任意图像重构算法。上述基于压缩采样的单像素成像需要使用一系列掩模来调制光场(调制过程发生在物光场之后还是之前是等效的),而每次调制对应的总光强由单像素测量或桶探测(积分面阵探测器上所有像素)获得。此外,基于压缩感知的计算鬼成像(CGI)^[8-9]也是 SPI 的另一实现方案。其实早在 2005 年,Sen 等^[10]就已提出对偶成像术(DP),指出可用单个光电探测器来代替传统阵列探测器(通常在移动手机、单反相机、星载相机中使用阵列探测器),通过物体与一系列掩模的作用获得单像素测量值,再结合掩模序列便可恢复出物体的空间光场分布信息。所以从某种意义上讲,DP 概念是 SPI 概念的雏形。而前述的 Hadamard 成像^[2-3]、Fourier 成像^[4]均基于全采样机理,即单像素测量次数等于待测图像像素数,当然二者也可与压缩采样结合。虽然电荷耦合器件(CCD)、互补金属氧化物半导体(CMOS)等面阵探测器凭借着其优良的性能、低廉的成本、可见光波段中的优势而广泛应用于诸多光电探测领域,但是 SPI 有着得天独厚的谱型适应(尤其在非可见光波段的优势)、超高的单像素探测频率、超快时间响应^[11]、弱光探测能力(可弱至单光子探测水平,有着更小的暗计数,可实现超灵敏成像^[12])、较低的测量维度、较少的测量数、较小的数据传输存储压力等特点,已经在荧光成

像光谱^[13]、X 光成像^[14-15]、激光雷达^[16-17]、雷达成像^[18-21]、太赫兹成像^[22]、穿透烟雾/湍流成像^[23-25]、三维成像^[26]、波前测量^[27-28]、涡旋波测量^[29]、数字全息^[30-31]、非视线内成像^[32]、超声成像^[33]等领域崭露头角并获得青睐。

从单像素成像机理来看,SPI 是一种静态成像方法,要求目标协作且在整个测量过程中保持相对静止状态以便完成 SPI 所需的所有测量,而图像重构质量与测量数平方根成正比,与物体图像像素数成反比^[34]。动态场景对 SPI 提出了巨大的挑战,正因为运动帧内的采样数与物体空间分辨率之间存在制衡关系,物体场景运动过快时,难以确保在单个运动帧内采集到足够的单像素值,这将直接导致图像退化或图像模糊问题。为了提高 SPI 的实时成像性能,世界上各大科研组做出了不懈的努力,而本文将从历史、现状、应用、发展趋势方面综述关于动态单像素成像的主要工作和贡献。

2 单像素成像基本原理

这里将简要介绍静态单像素成像的数学模型、基本工作原理及其成像装置,以揭示单像素成像背后的数学原理及其成像机理。

2.1 静态单像素成像背后的数学模型

经典的单像素成像又称压缩成像,主要面向静态目标图像,其基本原理在于将多次空间光场调制所对应的测量总光强与调制掩模进行符合计算,利用自然图像稀疏或可压缩表示的先验知识,将欠定病态问题转化为可解问题,以重构出物体图像。首先,从矩阵论和信号论的角度来理解单像素成像问题。对于一幅 $p \text{ pixel} \times q \text{ pixel}$ 的待测图像 I ,其总像素数 $N = p \times q$ 。当测量次数远小于 N 时,由线性测量所得的方程 $y = Ax + e$ 的测量(系数)矩阵 $A \in \mathbb{R}^{M \times N}$ 的行数(方程个数) M 将远小于 N ,很显然,求解此类欠定方程组相当于求解非确定性多项式困难(NP-hard)问题,这里的 x 为待测图像 I 按行(或列)拉伸所得的 N 维列向量, e 为测量噪声, y 为 M 个测量值(总光强测量序列)组成的列向量,而每次调制掩模 $P \in \mathbb{R}^{p \times q}$ 按行(或列)拉伸(将在图像重构时恢复出的图像列向量 \tilde{x} 也按对应规则反向拉伸回矩阵)所得的行向量即为 A 中的一行。通常方程个数需大于等于未知数个数,这样方程才可解,解法通常是求逆算法或迭代算法,包括上下三角分解、高斯消去法、Cholesky 分解、奇异值分解。但当假设待测图像 I 本身稀疏或可在某个域

$\Psi = [\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_N]$ (如 Harr 小波基、离散余弦变换基、Fourier 变换基) 下可稀疏表示^[5-6] (绝大多数的表示系数可以丢弃, 且对重建图像没有太大影响, 所以用来表征图像有用信息的表示系数 x' 的个数 K 可远小于 N), 即 $x = \Psi x'$ 或 $x = \sum_{i=1}^N x'_i \varphi_i$, 这里称 x 是 K 稀疏的, 测量模型则变为 $y = A \Psi x' + e$, 那么只需测量数大于等于 K , 便可将欠定问题转化为超定问题或满秩问题。求解此类问题的算法也有许多, 如基追踪^[35]、正交匹配追踪^[36]、迭代收缩阈值^[37]、全变分算法^[38]等。通过以上的测量模型分析不难看出, 在 SPI 的整个压缩采样 (M 次空间光场调制与相应的 M 次单像素测量) 过程中, 待测图像 I 始终是恒定不变。换言之, 无需依靠机械或电子扫描, 使用空间变化的不同调制掩模和毫无空间分辨能力的单像素探测器来重复测量物体场景, 持续测量 M 次。

2.2 单像素成像系统工作原理及空间光调制器

接下来回顾 SPI 的成像装置, 以便了解 SPI 是怎么工作起来的。SPI 成功的里程碑事件是将空间光调制器 (SLM) 引入了成像系统中, 直接避免了机械式或电子式扫描操作, CS 理论的运用让 SPI 方案变得切实可行。首个应用于 SPI 的 SLM 是数字微镜器件 (DMD), 它也是数字光投影仪 (DLP) 中的核心部件, 是由几十万到上百万个尺寸比头发丝还细的微镜组成的阵列, 每个微镜可通过电子寻址和静电吸附朝正负 12° (或 10°) 方向独立翻转, 这就实现了对光的 1 和 0 的调制, 即实现了光开关的功能, 通过这个功能很容易地就能对光场上任意组合的像

素进行总光强的测量。在早期, SPI 一般使用纯随机的由 0 和 1 组成的二值掩模, 后来取而代之的是通过随机打乱 Hadamard 编码矩阵的行和列元素来生成不相干的调制掩模, 而 Hadamard 矩阵本身具有很强的结构性, 可用于简化计算, 用此类随机测量矩阵可将采样率降至扫描/全采样的 $1/3$ 。近年来, SPI 中另一个重大突破在于使用正负调制和差分测量来进一步抑制测量噪声并大幅降低采样率至 15% 的水平甚至更低。通常 DMD 的调制频率在 20 kHz, 这也是 SPI 的成像速率的瓶颈。因此提高成像帧频 (降低采样率、提高调制速率和减少图像重构时间)、改进成像方案或者成像机理成了实时 SPI 的改进目标。

当然提及 SPI, 不得不提极其接近的 CGI 架构。CGI 通常应用于液晶 SLM^[8], 它能操控光场的幅值和相位信息, 也正因为此, 液晶 SLM 出光后的任意平面的光场都能通过精确数值计算得到, 且可在无需透镜条件下直接进行关联成像^[39]。无透镜的好处在于可以避免光学畸变、像差、色差等透镜典型问题^[11], 还可以通过点扩展函数增大焦深和提高光学分辨率^[40]。

需要指出的是, 在 SPI 中, SLM (包括 DMD、液晶 SLM、调制板、编码孔径板^[41-42] 等) 放置在物体前还是物体后是等效的, 即空间光场调制在物光场之前还是之后是等效的。空间光场调制在物光场之前, 则采用结构光照明 (计算照明); 空间光场调制在物光场之后, 则先进行成像后进行调制, 以结构化物光场^[8, 43], 其原理如图 1 所示。这里需要指出的是,

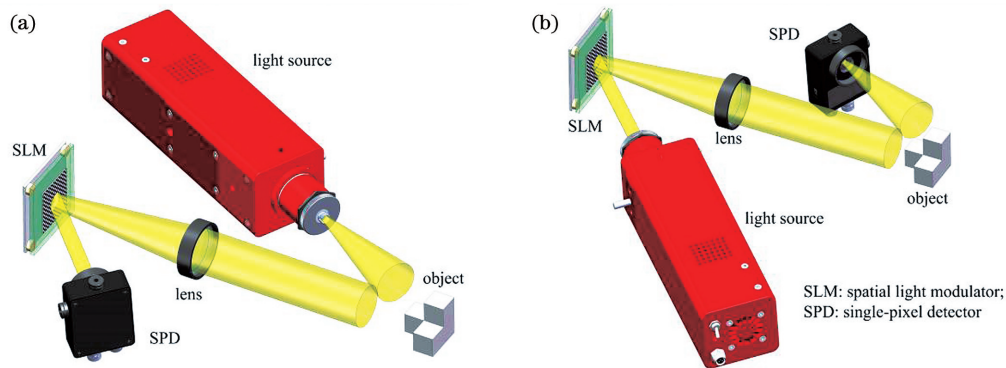


图 1 单像素成像装置。(a) 单像素相机装置, 通常物体被照亮并成像在空间光调制器上, 后者对物光场进行调制, 再由一个单像素探测器收集对应每次调制的总光强; (b) 结构光照明装置, 空间光调制器将调制后的光投影在物体上, 再由一个单像素探测器采样来自物体的后向散射光

Fig. 1 Single-pixel imaging configurations. (a) Single-pixel camera setup, where an object is illuminated and imaged onto an SLM, and then the total intensity corresponding to each modulation is collected by a single-pixel detector; (b) structured illumination scheme, where the SLM is used to project the modulated light onto the object, and then the backscattered light from the object is sampled by the single-pixel detector

SPI 的另一个形态是,用远少于图像像素数的少量单像素探测单元来单次或多次对调制后的光场进行采样,以进一步降低计算复杂度^[6,8]。

3 动态单像素成像的发展

实际应用中的目标物体通常是动态的,很难像实验物体那样协作配合或者在测量过程中恒定不变(除非凝视系统),这对单像素成像提出了巨大的挑战。近几年,单像素成像也正在经历着从静态成像向动态成像的转变。

3.1 提高成像帧率

3.1.1 降低采样率

采样率决定着单帧图像的采集时长,实现超低采样率是 SPI 不懈追求的目标。众多工作正在努力降低采样率、提高帧率至人眼分辨极限,以实现准实时成像。采用压缩感知是最初期的解决方案,但人们显然不会满足于 30% 的采样率,随后的正负调制^[44]、差分测量^[45]、连续微分测量^[46]方法的提出,将采样率进一步压缩至 15% 左右。前文已述,DMD 有着机械调制的上限,即 20 kHz,即便采用四象限探测器^[47]或者多二极管架构^[48],依然无法显著降

低采样率。

2017 年,北京航空航天大学的 Sun 等^[49]基于高阶 Hadamard 基(由 Hadamard 矩阵的行向量拉伸而得的掩模矩阵)的 1/4 是次高阶 Hadamard 基的等比例放大的规则,抛砖引玉地提出了一种俄罗斯套娃的 Hadamard 基排序方法,该方法可将采样率降低至 6%。其实在此之前 Hadamard 矩阵已经有了自然序、顺序序、双积序、随机序,俄罗斯套娃序是上述序的延伸和扩展。

2019 年,本课题组提出基于折纸构造掩模的单像素成像^[50]和基于切蛋糕(CC)的 Hadamard 基排序方法^[51],分别将采样率降低至 1% 和 0.2%。

2020 年,葡萄牙科英布拉大学的 Vaz 等^[52]比较了各种 Hadamard 基排序方法的优劣,各种序的 Hadamard 矩阵如图 2 所示,他们指出 CC 序在压缩采样率为 0.1 时的成像效果相比其他排序方法是最佳的,压缩采样率还可进一步降低。Yu 等^[53]进一步比较了更多的排序,指出 CC 序与所提出的全变分序的成像质量非常接近,在众多排序中是最佳的两个,在特定目标重建中,全变分序的重建质量略优。

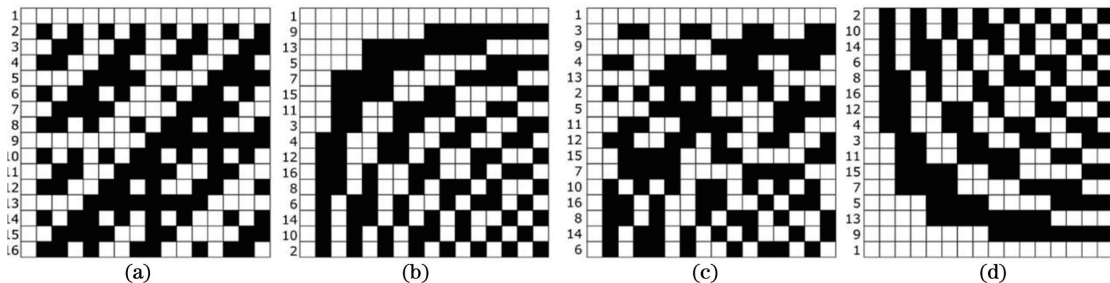


图 2 16 阶 Hadamard 基的不同排序^[52]。(a)自然序 Hadamard 矩阵;(b)沃尔什序 Hadamard 矩阵;(c)切蛋糕序 Hadamard 矩阵;(d)高频序 Hadamard 矩阵

Fig. 2 Different orderings of 16-order Hadamard basis^[52]. (a) Naturally ordered Hadamard matrix; (b) Walsh-ordered Hadamard matrix; (c) cake-cutting ordered Hadamard matrix; (d) high frequency ordered Hadamard matrix

2021 年,英国伦敦帝国理工学院的 Yuan 等^[54]在 Fourier 单像素成像的基础上提出将照明掩模按优化的序列重排,他们自适应、动态地根据训练图像的平均谱和记录的单像素强度值反馈来确定照明掩模的次序,在低采样率下获得了图像质量的提升。

3.1.2 提高调制频率

2017 年,暨南大学的 Zhang 等^[55]提出上采样和误差扩散抖动策略来在 DMD 上二值化 Fourier 基,提升了 DMD 显示灰度的帧率,以 DMD 的 20 kHz 满负荷翻转频率实现在 256 pixel × 256 pixel 动态场景中 10 frame/s 帧率的 Fourier 单像素成像。

2019 年,国防科技大学的 Liang 等^[56]提出利用

Sierra-Lite 抖动算法在 DMD 上加载 Fourier 变换,使得 DMD 上的灰度 Fourier 变换更接近于真实的 Fourier 变换,从而提高了图像质量,降低了噪声,并获得了高帧率,实现了快速 Fourier 单像素成像。

2020 年,伊朗大不里士大学的 Rajabi-Ghaleh 等^[57]提出随机掩模推扫方案,实现了对静态和动态物体的 CGI,其推扫逐行逐列进行,大幅提高了图像可视度、信噪比和对比噪声率(CNR)。

2018 年,北京航空航天大学的 Xu 等^[58]提出利用 32 pixel × 32 pixel 规模的发光二极管(LED)进行结构光照明,如图 3 所示,利用行列寻址将 $p \times q$ 个输入/输出(I/O)口降至 $p + q$ 个(当 $p = q$ 时,则降

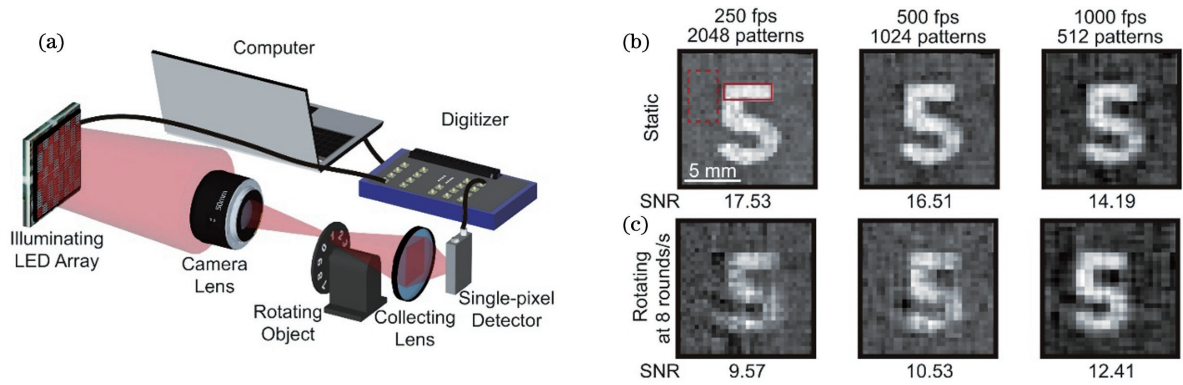


图 3 基于 LED 照明的单像素成像装置和静/动态成像结果^[58]。(a) 一个 $32 \text{ pixel} \times 32 \text{ pixel}$ 规模的 LED 阵列加载预设的 Hadamard 掩模, 光通过一个照相机镜头结构照明在一个旋转物体上, 该物体圆盘上均匀刻着 0~9 这 10 个数字, 透射的总光强由一个单像素探测器收集; (b) 静态物体重构结果, 250, 500, 1000 frame/s 对应的图像质量基本相同; (c) 动态物体重构结果, 物体运动速率为 8 r/s, 重构图像在 250 frame/s 和 500 frame/s 时发生了模糊

Fig. 3 LED-based single-pixel imaging configuration and static/dynamic imaging results^[58]. (a) A $32 \text{ pixel} \times 32 \text{ pixel}$ LED encoded with the preset Hadamard patterns projects structured illumination from a lens of a camera onto a rotating object, which is a disk uniformly carved with ten numbers from 0 to 9, while the transmitted light is collected by a single-pixel detector; (b) reconstructions of static object, whose qualities were similar at 250, 500, and 1000 frame/s; (c) reconstructions of dynamic object rotating at 8 r/s, whose qualities were degraded at 250 frame/s and 500 frame/s

至 $2p$ 个输入/输出), 鉴于其 LED 的切换时间可低于 $1 \mu\text{s}$ (LED 调制频率为 1 MHz, 远高于 DMD, 是 DMD 调制频率的 20 倍), 对每幅运动帧进行 500 次测量, 则帧率可达 1000 frame/s。

2019 年, 日本神户大学的 Nitta 等^[59] 提出使用立腔式表面发射激光阵列 (VCSELs) 来实现高速测量, 其激光器阵列尺寸为 $30 \text{ pixel} \times 30 \text{ pixel}$, 切换速率可达几百 MHz, 该方法大幅提高了计算成像效率, 激光器阵列总像素数可进一步扩展至 1200。

3.1.3 减少图像重构时间

中国科学院上海光学精密机械研究所司徒国海研究组^[60] 和美国麻省理工学院 Barbastathis 研究组^[61] 分别于 2017 年和 2019 年先后提出将单像素成像与深度学习相结合的方法, 通过迭代训练网络, 在低采样率下获得高质量图像, 该方法能缩短信号获取时间、加速图像重建过程, 进而促进动态单像素成像技术的发展。国防科技大学的刘伟涛研究组同样使用深度学习进行了运动目标跟踪^[62]。将深度学习用于单像素成像中可大幅减少图像重构时间, 但其代价是前期需要耗费大量时间用于样本类型打标签和深度神经网络训练工作。

3.2 改进成像方案或者成像机理

面向实际应用, 要想解决观测运动物体所带来的运动模糊, 还可从成像方案和成像机理层面考虑如何减小运动模糊对图像退化的影响, 其本质在于通过改进成像方案或者成像机理使得动态成像成为

可能, 并在一定程度上去除运动模糊。

2013 年, 中国科学院上海光学精密机械研究所韩申生研究组提出可通过 Fourier 变换鬼衍射来提高对抖动目标的成像精度^[63]。2014—2015 年, 该组还通过调整重构时的参考掩模与速度估计来对匀速运动目标进行成像^[64-65], 其中的散斑场校正为运动模糊的消除提供可借鉴的方案。

2014 年, 本课题组提出了自适应压缩成像^[66], 通过建立小波树, 从最底层的小波级开始, 通过在 DMD 加载粗略掩模对物体图像进行粗采样, 以获知感兴趣区域所在的像素区域, 之后到达上一层小波级, 在 DMD 这些像素区域中加载相对更精细的稀疏掩模, 再对物体图像进行细采样, 以获得需要进一步更精细采样的像素区域, 重复操作直至到达小波树的最顶层。通过这种方法可以进一步降低采样率。2016 年, 南京理工大学的 Dai 等^[67] 在上述基础上进一步提出了自适应视频小波域压缩采样, 通过使用扩展小波树在更大程度上减少了空时冗余, 采用多尺度框架能获得逐渐精细的稀疏小波表示系数用于评估运动, 鉴于其较小的计算消耗, 这种方法可用于实时重构, 而且能在获取相同图像质量的条件下降低传统采样率 $5\% \sim 15\%$ 。

2017 年, 北京航空航天大学的 Jiang 等^[68] 发现在 SPI 中, 物体通常只占据照射区域的一部分, 因此他们提出可根据 Fourier 切片理论进行自适应寻址, 以找到目标所在区域, 然后让照明掩模只照射在

该目标区域以提高成像效率。而且照射区域变小,成像区域也会变小,所需的实际采样数也随之减少,这对于实时成像大有裨益。

2019 年,深圳大学的 Jiao 等^[69]提出从单一图像帧中进行运动评估和质量提升,但该研究需要假设已知物体运动的类型,他们构造出关于运动目标的运动模型,在一定的搜索域内不断优化运动参数,有望在动态 SPI 中校正掩模以获得更高的图像质量。

暨南大学的 Zhang 等^[70-72]提出傅里叶域单像素测量方法,在无图像重构条件下利用傅里叶域到空间域的平移映射估计运动轨迹,并将该方法推广

到三维跟踪和目标分类中。如图 4 所示,该方法无需先获取图像便可直接根据单像素值来计算目标轨迹,其测量掩模个数可降至个位数,采样率得到大幅降低,该方法非常适用于目标跟踪和分类,也为动态单像素成像提供了新的思路和解决方案。国防科技大学的刘伟涛研究组提出先根据少量掩模获得模糊图像再计算其互相关系数以获得目标位移^[73];中国科学院安徽光学精密机械研究所朱文越研究组提出分别对图像横轴和纵轴进行一维 Hadamard 变换投影以评估出目标运动位置,所得分辨率为 256 pixel×256 pixel,帧频为 177 frame/s^[74]。

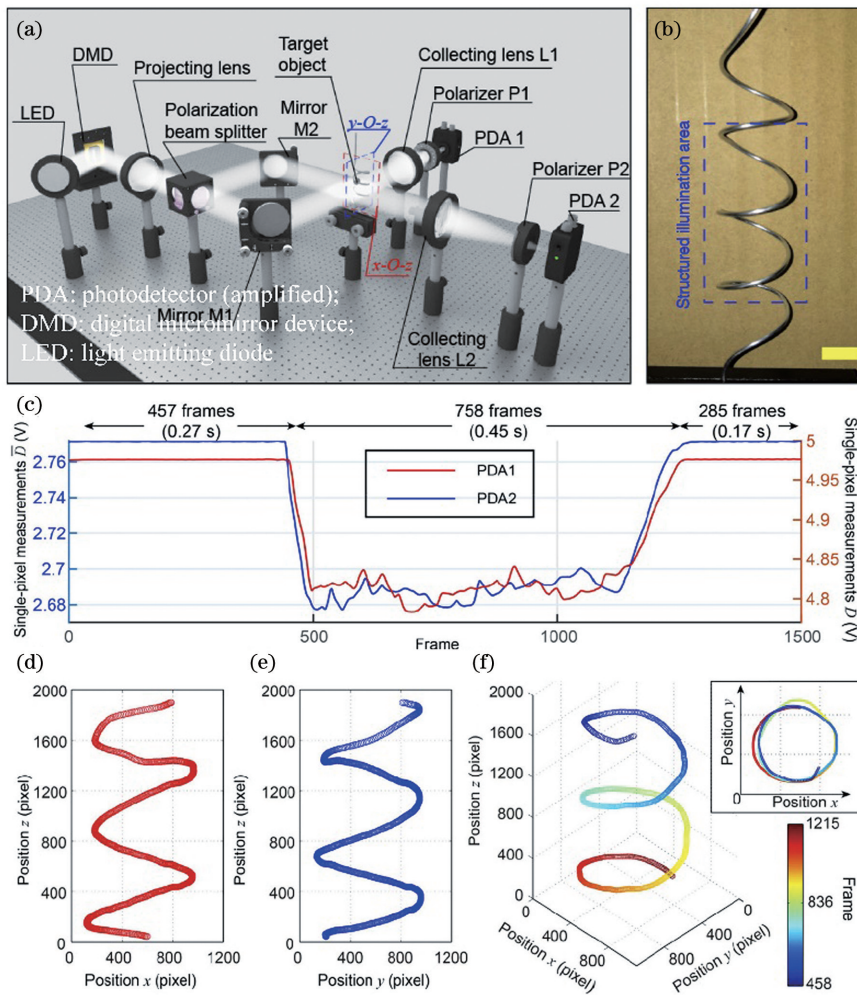


图 4 免图像三维跟踪系统框图和实验结果^[71]。(a)免图像实时三维跟踪的实验装置;(b)弯曲线的照片,比例尺为 1 cm;

(c)由两个探测器记录的单像素测量值;(d)(e)二维跟踪结果;(f)三维跟踪结果(方框中图是其顶视图)

Fig. 4 Schematic diagram of the image-free three-dimensional tracking system and experimental results. (a) Experimental setup of the image-free real-time three-dimensional tracking; (b) photograph of the bended wire with a scale bar of 1 cm; (c) single-pixel measurements recorded by two detectors; (d) (e) two-dimensional tracking results; (f) three-dimensional tracking result (the figure in the box is the top view)

4 动态单像素成像的讨论和展望

接下来回顾近几年动态单像素成像的实际应

用,并对其关键问题和今后的发展进行讨论和展望。

4.1 动态单像素成像应用

在去背景跟踪方面,美国罗切斯特大学的

Magaña-Loaiza 等^[75]于 2013 年提出了基于背景去除和运动目标稀疏特性的压缩跟踪成像,本课题组于 2015 年提出基于互补测量的压缩跟踪成像^[76],国防科技大学的刘伟涛研究组提出瞬时强度差分关联方案^[77]。

在目标跟踪方面,伊朗大不里士大学的 Gholami-Milani 等^[78]将灰度值运动目标成像推广到彩色运动目标成像,扩展了成像波段。

在工程应用方面,英国格拉斯哥大学的 Gibson 等^[79]利用单像素相机实时检测气体泄漏,对 16 pixel×16 pixel 的气体图像使用 256 个调制掩模,使气体成像的帧频达到约 25 frame/s。

在压缩视频方面,2018 年英国格拉斯哥大学的 Higham 等^[80]提出利用深度卷积自编码网络来以

30 frame/s 帧率实时恢复 128 pixel×128 pixel 的视频,如图 5 所示,其 SPI 系统使用了 DMD 作为 SLM,其重建效果相比传统方法的更好。英国格拉斯哥大学的 Zhang 等^[81]提出一种三维压缩单像素视频技术,该技术主要利用多个照明角度来获得物体三维形貌特征,对于 32 pixel×32 pixel、64 pixel×64 pixel 和 128 pixel×128 pixel 的三维物体的采样帧率可达 8.7 Hz、2.4 Hz 和 0.5 Hz,但仍然需要让三维物体在某次完整的压缩采样中保持相对静止。美国马里兰大学的 Goldstein 和美国莱斯大学的 Baraniuk 等^[82]合作提出多种分辨率的图像增强和压缩视频技术,对于奈奎斯特采样的数据能实现立即在线重构,并通过使用压缩感知来提高图像质量和重构精度。

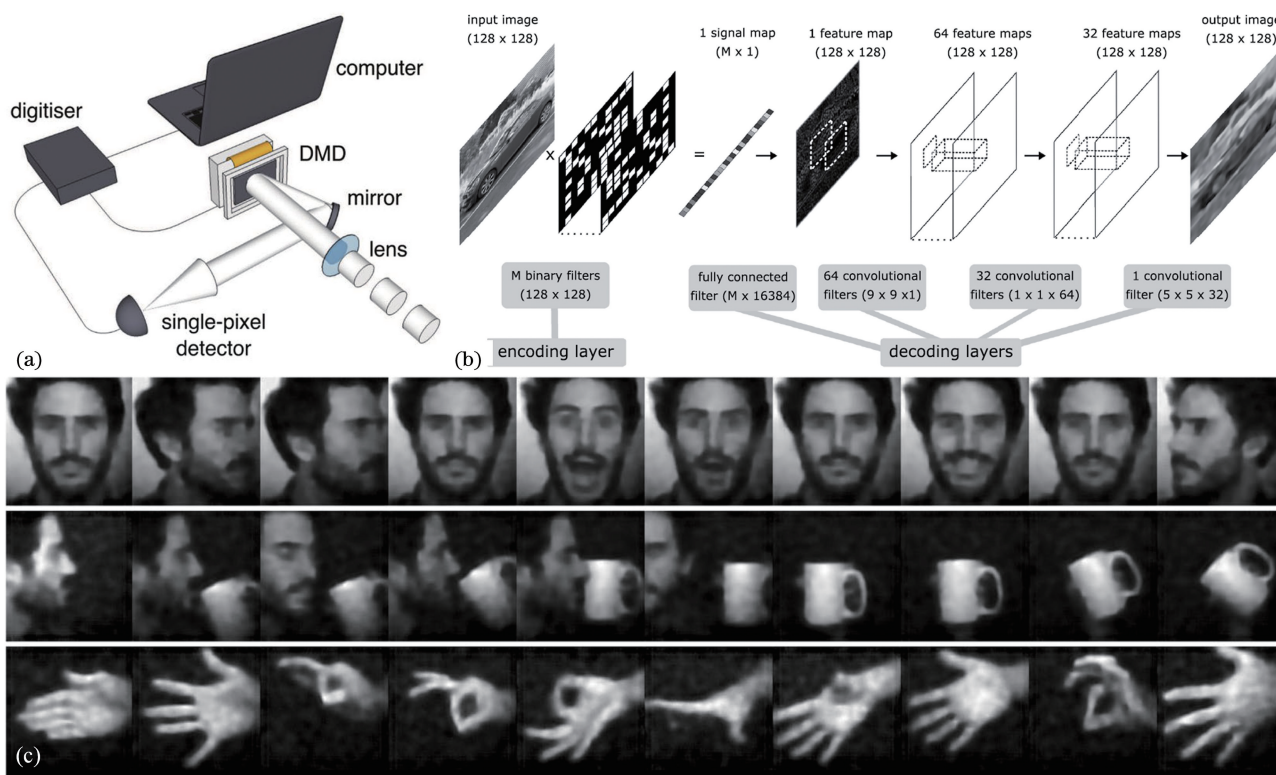


图 5 单像素实时视频成像装置和成像结果^[80]。(a)单像素实时视频成像的实验装置;(b)深度卷积自编码网络架构;(c)使用深度学习算法的重建结果(采样率为 4%)

Fig. 5 Imaging device and imaging results of single-pixel real-time video^[80]. (a) Experimental setup of single-pixel real-time video imaging; (b) architecture of deep convolutional auto-encoder network; (c) reconstructions using deep learning algorithm with sampling rate of 4%

在激光雷达方面,面向运动目标或运动平台的成像应用(目标与探测平台存在相对运动),中国科学院上海光学精密机械研究所韩申生研究组在早年静态激光雷达的基础上发展出了基于稀疏约束的航空器机载的近红外三维鬼成像技术,实现了运动平台下的高精度成像,在飞行器距离地面目标约

1.04 km 的条件下,获得的成像横向精度可达 0.48 m,深度分辨率可达 0.5 m^[83];之后又将该技术应用于行驶机动车辆对静态目标的机载成像之中^[84],取得了成功的实验验证;此外,该研究小组还提出利用行掩模的复用关系实现基于机载推扫的激光雷达^[85-86],这其实就是行扫描技术在运动平台成

像中的衍生,无需对目标的凝视即可完成测量过程。

在太赫兹成像方面,美国波士顿学院的 Watts 等^[87]利用超颖材料 SLM 实现了准实时的太赫兹单像素压缩成像,获得针对太赫兹图像的采集帧率为 1 Hz,远高于传统扫描方式的采集帧率^[88]。

在荧光寿命成像方面,本课题组提出了一种超灵敏时间分辨成像光谱仪及其时间分辨成像方法^[89];美国伦斯勒理工学院的 Intes 研究组于 2017 年实现了压缩超光谱时间分辨宽场荧光寿命成像^[90]。

在超光谱视频成像方面,北京理工大学的 Wang 等^[91]提出一种混合成像系统来获取四维高空时分辨高速超光谱视频,可在时间维度上对积分全谱进行亚采样,以获得高帧率的全色视频,通过在光谱维度上的压缩采样可得到 100 frame/s 的超光谱视频,以上帧率得益于增大的光通量和自适应字典的稀疏表示。

在显微成像方面,香港中文大学的 Wen 等^[92]将压缩感知用于快速三维随机存取的双光子显微仪中,将光电倍增管(PMT)作为单像素探测器,采用 DMD 作为 SLM,提出多聚焦压缩感知方法,该方法对任意目标区域的成像速率相比经典的扫描方式提高了 3~5 倍而无需牺牲图像质量。他们还进行了相关的实验验证,实验中的采样率为 25%,采用了 5 个焦区进行成像分析。其实这种方法是基于二值全息,有望在生物显微成像中大放异彩,对于研究超快动态生物事件和观测活体中多感兴趣区域有着重要的应用价值。

在血细胞计数方面,日本 Thinkcyte 公司和东京大学的 Ota 等^[93]提出了基于鬼成像的细胞识别和分选方案,并将其与人工智能相结合,无需图像重构就可利用细胞形态学实现精准、高效、高通量的细胞分类和选择排序,且实现装置紧凑、成本低廉,该方法将有助于提高对活化细胞样品进行细胞类型分离的准确性和诊断能力,有望实现商业化。

以上仅列举了少量具有代表性的应用,但这些例子足以展现出动态单像素成像的广阔应用前景,更多的应用在此不再赘述。

4.2 动态单像素成像讨论与展望

将静态单像素成像机制变革为动态单像素成像机制不是一蹴而就的事情。随着单像素成像技术慢慢步入正轨和逐渐投入实际应用之中,有以下几个问题值得思考。

1) 采样率与掩模构造问题。为无限逼近亚

(下)采样的极限,已有许多工作在确定性掩模排序上持续攻坚克难,确实初见成效,将采样率大幅降低,但是是否存在极限排序掩模或者某种排序规律,以及确定性掩模该如何构造是未来亟须解决的科学问题。

2) 调制问题。制约单像素成像采样速率的主要因素是空间光调制器。前文已经介绍了多种调制方案,硬件性能的提高往往是提高采样频率的最直接方式,液晶器件的调制频率必然低于机械式翻转频率,机械式翻转频率必定低于电子刷新频率,电子刷新频率必定低于物理化学材料的物相改变速率,因此设计新型材料是推进动态单像素成像的关键。而在灰度调制方面,应当在抖动算法基础上推演出更多能降低单帧灰度掩模所需的二值调制次数的方法。

3) 计算问题。单像素成像通常需要用计算时间来换取测量维度和采样率的降低,庞大的计算量和计算复杂度阻碍动态单像素成像实现在线实时成像功能,归根结底是算法问题。虽然计算时间可以通过现场可编程门阵列(FPGA)和图像处理器(GPU)等先进的计算加速硬件来减少,但如果不能降低计算复杂度,通过物理硬件的提速都是非常有限的,因而从算法上提速还亟待更多研究工作的投入。

4) 基于单像素成像机制的运动模糊消除问题。动态单像素成像中,目标与成像系统之间的相对运动与离散测量必然造成重构图像的运动模糊,如何消除此类运动模糊是未来研究方向的大势所趋。如果能直接预测或测量出目标运动轨迹势必将减小运动模糊的负面影响,甚至可以不依赖于图像重构实现轨迹的捕捉。研究者也可沿着设计具备消运动模糊特性的新的单像素成像方案的思路进行探索。此外,利用少量像素并行探测接收或少量像素辅助测量的方式也不失为提升成像帧频的可行方案。

5) 成像机理问题。这是最为关键的问题,针对动态运动目标的成像,因帧与帧之间必然存在一定的空时关联,因此非常有必要探究这些关联如何能让测量掩模复用,以进一步降低帧间采样率,优化采样机制,减小测量噪声,提高图像质量等。

6) 应用问题。已经有许多工作推进了动态单像素成像在多领域的应用发展,但是动态单像素成像的产业化道路依然还很漫长,这绝不是靠无数科研工作者持续不断的创新就能推动的,更需要科技创新企业的关注和技术孵化。只有科研和企业、社

会的需求对接,才可能推动单像素成像的长远发展,让单像素成像走出实验室。

5 结 论

单像素成像是一种非直接测量的计算成像技术,其采用无空间分辨能力的单像素探测器且基于计算成像机理,具备了多谱型适应、降维亚采样、超高单像素探测频率、超快时间响应、极弱光超灵敏成像能力、少量数据传输存储等特点,因此得到荧光显微成像、生物医疗、国防科技、非可视波段成像、多维成像、非视线内成像等领域的青睐。介绍了单像素成像的基本原理和内在成像机理,回顾了静态单像素成像走向动态单像素成像的发展历程,列举了一系列里程碑式代表性贡献(主要集中在提高成像帧频、改进成像方案或者成像机理等方面),展示了动态单像素成像的广阔应用前景,分析了目前尚存在的科学问题和技术瓶颈,建议今后着重探索解决动态单像素成像中的采样率与掩模构造问题、调制问题、计算问题、基于单像素成像机制的运动模糊消除问题、成像机理问题、应用问题。相信在可预见的未来,这些问题都会逐一解决,在此关键时期,仅有迎难而上才能迎来单像素成像的动态新纪元。

参 考 文 献

- [1] Baird J L. Apparatus for transmitting views or images to a distance: US1699270[P]. 1929-01-15.
- [2] Pratt W K, Kane J, Andrews H C. Hadamard transform image coding [J]. Proceedings of the IEEE, 1969, 57(1): 58-68.
- [3] Sloane N J, Harwit M. Masks for Hadamard transform optics, and weighing designs[J]. Applied Optics, 1976, 15(1): 107-114.
- [4] Zhang Z, Ma X, Zhong J. Single-pixel imaging by means of Fourier spectrum acquisition [J]. Nature Communications, 2015, 6: 6225.
- [5] 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.
- [6] Donoho D L. Compressed sensing [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(4): 1289-1306.
- [7] Shao X P, Liu F, Li W, et al. Latest progress in computational imaging technology and application [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(2): 020001.
邵晓鹏, 刘飞, 李伟, 等. 计算成像技术及应用最新进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(2): 020001.
- [8] Shapiro J H. Computational ghost imaging [J]. Physical Review A, 2008, 78(6): 061802.
- [9] Katz O, Bromberg Y, Silberberg Y. Compressive ghost imaging [J]. Applied Physics Letters, 2009, 95(13): 131110.
- [10] Sen P, Chen B, Garg G, et al. Dual photography [J]. ACM Transactions on Graphics, 2005, 24(3): 745-755.
- [11] Edgar M P, Gibson G M, Padgett M J. Principles and prospects for single-pixel imaging [J]. Nature Photonics, 2019, 13(1): 13-20.
- [12] Yu W K, Liu X F, Yao X R, et al. Single-photon compressive imaging with some performance benefits over raster scanning [J]. Physics Letters A, 2014, 378(45): 3406-3411.
- [13] Studer V, Bobin J, Chahid M, et al. Compressive fluorescence microscopy for biological and hyperspectral imaging [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2012, 109(26): E1679-E1687.
- [14] Zhang A X, He Y H, Wu L A, et al. Table-top X-ray ghost imaging with ultra-low radiation [J]. Optica, 2018, 5(4): 374-377.
- [15] Sefi O, Klein Y, Strizhevsky E, et al. X-ray imaging of fast dynamics with single-pixel detector [J]. Optics Express, 2020, 28(17): 24568-24576.
- [16] Howland G A, Dixon P B, Howell J C. Photon-counting compressive sensing laser radar for 3D imaging [J]. Applied Optics, 2011, 50(31): 5917-5920.
- [17] Zhao C Q, Gong W L, Chen M L, et al. Ghost imaging lidar via sparsity constraints [J]. Applied Physics Letters, 2012, 101(14): 141123.
- [18] Baraniuk R, Steeghs P. Compressive radar imaging [C] // 2007 IEEE Radar Conference, April 17-20, 2007, Waltham, MA, USA. New York: IEEE Press, 2007: 128-133.
- [19] Xu R, Li Y C, Xing M D, et al. 3-D ghost imaging with microwave radar [C] // 2014 IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques (IST) Proceedings, October 14-17, 2014, Santorini, Greece. New York: IEEE Press, 2014: 190-194.
- [20] He X Z, Liu C C, Liu B, et al. Sparse frequency diverse MIMO radar imaging for off-grid target based on adaptive iterative MAP [J]. Remote Sensing, 2013, 5(2): 631-647.
- [21] Li D Z, Li X, Qin Y L, et al. Radar coincidence imaging: an instantaneous imaging technique with stochastic signals [J]. IEEE Transactions on

- Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(4): 2261-2277.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] Gong W L, Han S S. Correlated imaging in scattering media[J]. Optics Letters, 2011, 36(3): 394-396.
- [25] 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.
- [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] Soldevila F, Durán V, Clemente P, et al. Phase imaging by spatial wavefront sampling[J]. Optica, 2018, 5(2): 164-174.
- [28] Liu R F, Zhao S P, Zhang P, et al. Complex wavefront reconstruction with single-pixel detector [J]. Applied Physics Letters, 2019, 114 (16): 161901.
- [29] Zhao S P, Chen S Q, Wang X, et al. Measuring the complex spectrum of orbital angular momentum and radial index with a single-pixel detector [J]. Optics Letters, 2020, 45(21): 5990-5993.
- [30] Clemente P, Durán V, Tajahuerce E, et al. Compressive holography with a single-pixel detector [J]. Optics Letters, 2013, 38(14): 2524-2527.
- [31] Zhang H, Cao L C, Jin G F, et al. Progress on lensless digital holography imaging based on compressive holographic algorithm [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(8): 080001.
张华, 曹良才, 金国藩, 等. 基于压缩感知算法的无透镜数字全息成像研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(8): 080001.
- [32] Chan S, Warburton R E, Gariepy G, et al. Fast tracking of hidden objects with single-pixel detectors [J]. Electronics Letters, 2017, 53 (15): 1005-1008.
- [33] Huynh N, Zhang E, Betcke M, et al. Single-pixel optical camera for video rate ultrasonic imaging [J]. Optica, 2016, 3(1): 26-29.
- [34] Chan K W C, O' Sullivan M N, Boyd R W. Optimization of thermal ghost imaging: high-order correlations vs. background subtraction [J]. Optics Express, 2010, 18(6): 5562-5573.
- [35] Chen S S, Donoho D L, Saunders M A. Atomic decomposition by basis pursuit [J]. SIAM Journal on Scientific Computing, 1998, 20(1): 33-61.
- [36] Pati Y C, Rezaifar R, Krishnaprasad P S. Orthogonal matching pursuit: recursive function approximation with applications to wavelet decomposition [C] // Proceedings of 27th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, November 1-3, 1993, Pacific Grove, CA, USA. New York: IEEE Press, 1993: 40-44.
- [37] Daubechies I, Defrise M, de Mol C. An iterative thresholding algorithm for linear inverse problems with a sparsity constraint [J]. Communications on Pure and Applied Mathematics, 2004, 57(11): 1413-1457.
- [38] Wang Y L, Yang J F, Yin W T, et al. A new alternating minimization algorithm for total variation image reconstruction [J]. SIAM Journal on Imaging Sciences, 2008, 1(3): 248-272.
- [39] 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.
- [40] Ermeydan E Ş, Çankaya İ, Şahin A B. Super-resolution algorithm applied to images acquired at millimeter wave frequency in single pixel and computational ghost imaging configurations [J]. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2019, 33(17): 2328-2340.
- [41] Golay M J E. Multi-slit spectrometry [J]. Journal of the Optical Society of America, 1949, 39(6): 437-444.
- [42] Swift R D, Wattson R B, Jr Decker J A, et al. Hadamard transform imager and imaging spectrometer [J]. Applied Optics, 1976, 15 (6): 1595-1609.
- [43] Gibson G M, Johnson S D, Padgett M J. Single-pixel imaging 12 years on: a review [J]. Optics Express, 2020, 28(19): 28190-28208.
- [44] Yu W K, Liu X F, Yao X R, et al. Complementary compressive imaging for the telescopic system [J]. Scientific Reports, 2014, 4: 5834.
- [45] Yu W K, Yao X R, Liu X F, et al. Compressive microscopic imaging with "positive-negative" light modulation [J]. Optics Communications, 2016, 371: 105-111.
- [46] Li Y X, Yu W K, Leng J, et al. Pseudo-thermal

- imaging by using sequential-deviations for real-time image reconstruction[J]. *Optics Express*, 2019, 27(24): 35166-35181.
- [47] Sun M J, Chen W, Liu T F, et al. Image retrieval in spatial and temporal domains with a quadrant detector[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(5): 1-6.
- [48] Herman M A, Tidman J, Hewitt D, et al. A higher-speed compressive sensing camera through multi-diode design[J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8717: 871706.
- [49] 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.
- [50] Yu W K, Liu Y M. Single-pixel imaging with origami pattern construction[J]. *Sensors*, 2019, 19(23): E5135.
- [51] Yu W K. Super sub-Nyquist single-pixel imaging by means of cake-cutting Hadamard basis sort [J]. *Sensors*, 2019, 19(19): E4122.
- [52] Vaz P G, Amaral D, Ferreira L F R, et al. Image quality of compressive single-pixel imaging using different Hadamard orderings [J]. *Optics Express*, 2020, 28(8): 11666-11681.
- [53] Yu X, Yang F, Gao B, et al. Deep compressive single pixel imaging by reordering Hadamard basis: a comparative study [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 55773-55784.
- [54] Yuan A Y, Feng J, Jiao S M, et al. Adaptive and dynamic ordering of illumination patterns with an image dictionary in single-pixel imaging [J]. *Optics Communications*, 2021, 481: 126527.
- [55] Zhang Z B, Wang X Y, Zheng G A, et al. Fast Fourier single-pixel imaging via binary illumination [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 12029.
- [56] Liang Z Y, Cheng Z D, Liu Y Y, et al. Fast Fourier single-pixel imaging based on Sierra-Lite dithering algorithm [J]. *Chinese Physics B*, 2019, 28(6): 064202.
- [57] Rajabi-Ghaleh S, Olyaeefar B, Kheradmand R, et al. Ultra-fast vivid computational ghost imaging of still and moving objects by sweeping random patterns[J]. *Journal of Optics*, 2020, 22(9): 095701.
- [58] 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.
- [59] Nitta K, Yano Y, Kitada C, et al. Fast computational ghost imaging with laser array modulation [J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(22): 4807.
- [60] Lyu M, Wang W, Wang H, et al. Deep-learning-based ghost imaging[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 17865.
- [61] Barbastathis G, Ozcan A, Situ G H. On the use of deep learning for computational imaging[J]. *Optica*, 2019, 6(8): 921-943.
- [62] 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.
- [63] 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.
- [64] 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: 251120.
- [65] 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.
- [66] 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.
- [67] Dai H D, Gu G H, He W J, et al. Adaptive video compressed sampling in the wavelet domain [J]. *Optics & Laser Technology*, 2016, 81: 90-99.
- [68] Jiang H Z, Zhu S G, Zhao H J, et al. Adaptive regional single-pixel imaging based on the Fourier slice theorem [J]. *Optics Express*, 2017, 25(13): 15118-15130.
- [69] 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.
- [70] 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.
- [71] 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.
- [72] 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.
- [73] 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.
- [74] 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.
- [75] Magaña-Loaiza O S, Howland G A, Malik M, et al. Compressive object tracking using entangled photons [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102 (23): 231104.
- [76] Yu W K, Yao X R, Liu X F, et al. Compressive moving target tracking with thermal light based on complementary sampling[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(13): 4249-4254.
- [77] 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.
- [78] Gholami-Milani S, Olyaeefar B, Ahmadi-Kandjani S, et al. Grayscale and color ghost-imaging of moving objects by memory-enabled, memoryless and compressive sensing algorithms[J]. *Journal of Optics*, 2019, 21(8): 085709.
- [79] 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.
- [80] 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.
- [81] Zhang Y W, Edgar M P, Sun B Q, et al. 3D single-pixel video[J]. *Journal of Optics*, 2016, 18 (3): 035203.
- [82] Goldstein T, Xu L N, Kelly K F, et al. The STOne transform: multi-resolution image enhancement and compressive video[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2015, 24(12): 5581-5593.
- [83] Wang C L, Mei X D, Pan L, et al. Airborne near infrared three-dimensional ghost imaging LiDAR via sparsity constraint [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(5): 732-740.
- [84] Mei X D, Wang C L, Pan L, et al. Experimental demonstration of vehicle-borne near infrared three-dimensional ghost imaging LiDAR [C] // Conference on Lasers and Electro-Optics, San Jose, California. Washington, D.C.: OSA, 2019: JW2A.7.
- [85] 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.
- [86] 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.
- [87] 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.
- [88] Withayachumnankul W, Abbott D. Compressing onto a single pixel[J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(8): 593-594.
- [89] Zhai G J, Yu W K, Wang C. Ultra-sensitive time resolution imaging spectrometer and time resolution imaging method thereof: CN103090971B[P]. 2013-05-08.
翟光杰, 俞文凯, 王超. 一种超灵敏时间分辨成像光谱仪及其时间分辨成像方法: CN103090971B[P]. 2013-05-08.
- [90] Pian Q, Yao R Y, Sinsuebphon N, et al. Compressive hyperspectral time-resolved wide-field fluorescence lifetime imaging[J]. *Nature Photonics*, 2017, 11(7): 411-414.
- [91] Wang L Z, Xiong Z W, Huang H, et al. High-speed hyperspectral video acquisition by combining Nyquist and compressive sampling[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2019, 41(4): 857-870.
- [92] Wen C Y, Ren M D, Feng F, et al. Compressive sensing for fast 3-D and random-access two-photon microscopy[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(17): 4343-4346.
- [93] Ota S, Horisaki R, Kawamura Y, et al. Ghost cytometry[J]. *Science*, 2018, 360 (6394): 1246-1251.