光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20251126002

LED阵列循环选择投影的运动目标单像素成像与轨迹追踪

潘　武，廖　娅，杨　桓*

（重庆邮电大学 电子科学与工程学院，重庆 400065）

摘　要： 单像素成像作为一种非局域的成像方法，在遥感监测、生物医学成像、军事安全及工业检测等多领域应用前景广泛。文章提出一种基于单像素成像的运动目标跟踪成像方法，无需先验信息即可对速度和方向未知的运动物体成像并获取轨迹。该方法利用LED阵列对Hadamard矩阵进行循环选择投影，结合循环迭代算法，在低单次采样率的情况下直接得到模糊图像，大幅度降低单次成像所需的投影散斑。通过计算模糊图像低阶矩获取质心位置，移动并叠加模糊图案以恢复高质量图像。实验结果证明，所提方法可以对快速变化的运动目标成像并追踪轨迹，相比传统相邻帧运动估计方法减少了计算时间。该研究为单像素成像在运动目标成像领域的发展提供了一种新的方法。

关键词： 关联成像；运动目标追踪；计算成像

中图分类号： TP391.41　**文章编号：** 1001－5868(2026)02－0417－06

Single-Pixel Imaging and Trajectory Tracking of Moving Targets Based on Cyclic Selective Projection of LED Arrays

PAN Wu, LIAO Ya, YANG Huan

(**School of Electronic Science and Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, CHN**)

Abstract: Single-pixel imaging—a nonlocal imaging modality—has broad application potential in remote sensing, biomedical imaging, military security, and industrial inspection. This paper proposes a motion-target tracking and imaging method based on single-pixel imaging that reconstructs moving objects with unknown speeds and directions while recovering their trajectories without prior information. A light-emitting diode array is used to cyclically project Hadamard patterns, combined with a cyclic iterative algorithm to directly reconstruct blurred images at a low sampling rate, thereby significantly reducing the number of projection patterns required per image. The low-order moments of the blurred images are calculated to determine the centroid positions, and the blurred patterns are shifted and superimposed to recover high-quality image reconstructions. Experiments demonstrate that this method can image rapidly moving targets and track their trajectories, reducing the computational time compared with traditional motion estimation methods based on adjacent frames. This study provides a new approach for extending single-pixel imaging to motion-target imaging.

Key words: ghost imaging; moving-target tracking; computational imaging

收稿日期：2025－11－26.

*通信作者：杨　恒

0 引言

单像素成像又称鬼成像，是一种使用光学相关测量的非局域获取物体图像的技术[1]。传统鬼成像系统中包含两束光路，一束通过待测物体，被无空间分辨率的桶探测器接收，即信号光路；另一束被具有空间分辨率的电荷耦合器件（Charge-Coupled Device，CCD）接收，即参考光路。相较于传统阵列成像，鬼成像具有灵敏度高、抗干扰等优势，能够在水下环境中有效获取图像[2]。为了简化鬼成像系统，研究者提出计算鬼成像方案。该方案利用空间光调制器（SLM）、数字微镜器件（DMD）、LED阵列生成投影散斑，仅需要一条光路就可以实现目标物体的图像重建，因此也被称为单像素成像。单像素成像凭借其众多优点，在空间遥感[3]、光学加密[4]、激光雷达[5]、医学成像[6]、近红外成像[7]、太赫兹成像[8]、宽带和高光谱成像[9]、X射线成像[10]和散射介质成像[11]等领域中具有广阔的应用前景。

近年来，研究者致力于推进单像素成像的实用化进程，以尽快发挥其优势[12]。实际应用往往离不开对运动物体的成像，但物体和成像系统之间的相对运动必然会影响成像结果。基于二阶关联运算的单像素成像需要较长的采样时间[13]，且需要多次测量才能恢复图像。因此，减少单帧图案成像所需的投影散斑以及提高散斑的投影速度，是实现高速运动物体单像素成像的关键。

DMD和SLM的图案刷新率有限，对实现运动物体单像素成像形成挑战。为提高光源调制速度，Song等利用液晶显示器（LCD）生成128×128像素的结构化伪随机图案[14]，大幅减少了图像重建所需要的测量次数。Xu等开发了一个32×32像素的高速LED照明模块[15]，其光场刷新率高达500 kHz，能以1 kHz的帧速率生成连续图像。高速的散斑投影，对实现运动物体单像素成像至关重要。

在单像素成像中，目标物体与光轴之间的相对运动会导致重建图像模糊，而通过运动补偿可以缓解图像的模糊问题。Jiao等[13]建立物体的运动模型，当运动状态已知时，通过沿物体运动的相反方向对调制图案进行等效运动，得到高质量的重建图像。Yang等[16]提出一种基于单像素成像的跟踪补偿方法，通过根据物体的运动行为来设计散斑图案，可有效消除运动模糊。Wu等利用运动帧之间的信息来实现目标物体的单像素成像，通过计算模糊图像的互相关峰和自相关峰来获得物体在相应瞬间的位移，然后逐步重建高质量图像[17]。Yang等[18]提出一种基于压缩感知和低阶矩估计地运动目标跟踪成像方法，在图像处理过程中逐步进行运动估计和补偿，最后使用压缩感知算法重建目标图像。压缩感知算法虽然可以减少重建图像所需要地测量次数，但是会增加计算成本。

本文提出一种基于LED阵列的单像素成像方案，无需先验信息，能够对速度和方向未知的运动物体进行成像，并获得物体的运动轨迹。使用LED阵列对Hadamard矩阵进行循环选择投影，在采样率为12.3%、投影率仅为9.228 5%的情况下，无需压缩感知直接获得图案的模糊图像，再根据模糊图像的低阶矩获取图案的质心位置。最后，通过质心位置，将模糊图案进行移动后再叠加，得到高质量图像。实验结果表明，所提方案能对速度变化的运动目标进行成像，并获得其运动轨迹。

1 单像素成像方法

1.1 基于LED阵列的单像素成像原理

基于LED阵列的单像素成像系统如图1所示。LED阵列产生一系列照明图案，这些照明图案经过透镜照射物体后的反射光由桶探测器接收。假设单个照明图案为S_m（$m=1,2,\cdots,N$），桶探测器获得的对应信号为B_m（$m=1,2,\cdots,N$）。考虑到Hadamard矩阵的正交性及二元性，有“－1”和“1”两种状态，采用Hadamard矩阵作为调制图案。当使用Hadamard矩阵作为调制图案时，对于像素大小为N的图案，只需要N次测量就可以重构目标图像I，重建算法可以表示为[19]：

$$I=\sum_{m=1}^{N}S_m\cdot B_m \tag{1}$$

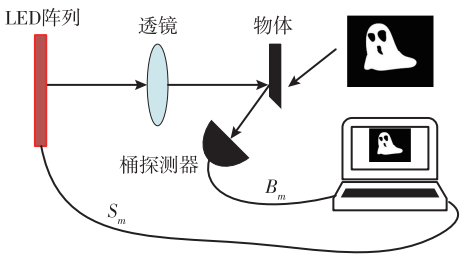


图1 基于LED的单像素成像方案

LED阵列无法直接显示“－1”的状态，则将Hadamard矩阵中的“－1”变为“0”，更改后的Hadamard矩阵及其差分模式用于显示完整的

Hadamard模式并实现噪声抑制。采用行列控制方式驱动LED阵列，仅需$2N$个控制信号即可控制规模为$N\times N$的LED阵列，相比于每个LED独立控制，大幅减少了控制信号线的数量。利用FPGA，通过$2N$个I/O口输出控制信号，达到控制LED阵列的目的。相较于传统使用DMD的方案，LED阵列的调制速度更高。但采用线控方式，LED阵列无法直接显示一个完整Hadamard矩阵，故需要将变化后的Hadamard矩阵图案进行如图2的方式分割成两个部分来显示。图2则是拆分一个4阶变化后的Hadamard矩阵的示意图，其中，白色部分为LED点亮的状态，黑色部分为LED熄灭的状态。

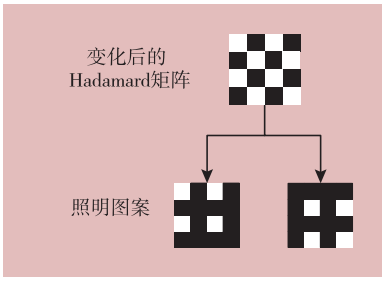


图2　LED阵列显示Hadamard矩阵示意图

1.2　照明模式的选择及跟踪成像方法

实验选择新的照明模式来降低采样率。为了降低单像素成像系统的采样率，提出一种基于Hadamard矩阵的优化照明形式。通过筛选原始Hadamard矩阵中无需差分拆分的子集，直接由LED阵列生成具有轮廓特征的低维照明图案，从而减少硬件实现复杂度。即变化后的Hadamard矩阵及其差分图案矩阵集为$\boldsymbol{H}$，筛选出来的子集$\boldsymbol{H}_{\text{opt}}$满足条件：

$$\boldsymbol{H}_{\text{opt}}=\left\{h\in\boldsymbol{H}\middle|(\exists i,\forall j,h_{ij}=1)\vee(\exists j,\forall i,h_{ij}=1)\vee(\forall i,\forall j,h_{ij}=0)\right\}$$

$\boldsymbol{H}_{\text{opt}}$可直接通过LED阵列显示，无需拆分，可减少$n$张LED阵列的投影图案，$n$为$\boldsymbol{H}_{\text{opt}}$中矩阵的数量。$\boldsymbol{H}_{\text{opt}}$中的照明图案携带目标物体的轮廓特征，从剩余矩阵中随机选择相同数量矩阵，该过程的示意图如图3。整个运动一共分为J帧，每帧又分为k个子过程，每个子过程对应重构的图像为I_k。

在第k个时间间隔内，照明矩阵共有$2m$张：前m张为H_{opt}对应的等效原始Hadamard矩阵（$m=2n/2$），后m张则从前$k-1$个子过程后剩余矩阵中随机抽取。因此，在第k个时间间隔内，照明图案的序列为$\boldsymbol{H}^k=\left\{H_1^k,H_2^k,\cdots,H_{2m}^k\right\}$，检测到的桶探测器探测

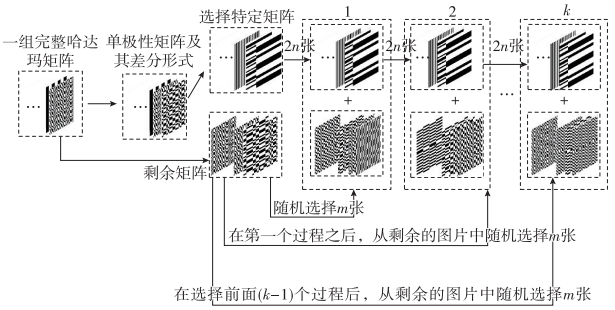


图3　单像素成像系统的照明图案选择

到强度为$\boldsymbol{B}^k=\{B_1^k,B_2^k,\cdots,B_{2m}^k\}$。对照明序列$\boldsymbol{H}^k=\left\{H_1^k,H_2^k,\cdots,H_{2m}^k\right\}$和桶探测器强度序列$\boldsymbol{B}^k=\{B_1^k,B_2^k,\cdots,B_{2m}^k\}$进行二阶关联计算，可得到第$k$个模糊图像$I_k$，即$I_k=I_{k,1\to m}+I_{k,(m+1)\to 2m}$，$I_{k,1\to m}$为前$m$张照明图案对应生成的重构图案，$I_{k,(m+1)\to 2m}$为后$m$张照明图案对应生成的重构图案。为准确估计每个时间周期中物体位置，常用的图像二值化[20]或计算图像的系数矩阵[21]等都需要进行预处理操作，对于运动物体成像来讲，消耗时间很长。因此，实验考虑利用图像低阶矩来提取运动物体的运动信息。

二维图案的几何矩$\boldsymbol{m}_{pq}$可定义为[22]：

$$\boldsymbol{m}_{pq}=\sum\nolimits_{x,y}x^p y^q O(x,y)\tag{2}$$

式中，p和q是几何矩的阶数，取0或1。通过二维图案的零阶和一阶几何矩来获得图案的质心(x_c,y_c)：

$$x_c=\frac{m_{10}}{m_{00}}\tag{3}$$

$$y_c=\frac{m_{01}}{m_{00}}\tag{4}$$

利用公式(2)～(4)可求得低质量图像I_k的质心(x_c,y_c)。第k帧图像I_k与第一帧I_1间的位移由图案质心位移确定。将后面$k-1$帧图案移动到第一帧的位置，叠加之后的图案为$I_{1\to k}$，即：

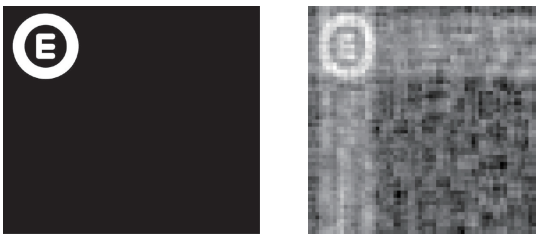
$$I_{1\to k}=\frac{1}{k}\sum\nolimits_{i=1}^{k}I_{i,1\to m}+\sum\nolimits_{i=1}^{k}I_{i,(m+1)\to 2m}\tag{5}$$

每帧中可以得到一个质量更加清晰的图案$I_{1\to k}$，记为$I_{1\to k}^J$。最后通过移动图案$I_{1\to k}^J$来进行运动补偿，逐步叠加得到清晰的图案，并且可以获得目标图案运动的轨迹。

2　基于LED阵列的单像素成像仿真

模拟仿真采用的目标图像如图4(a)所示。若要进行全采样，则需要4 096张Hadamard矩阵。利用前面提出的投影方法，首先选出矩阵的数量为

127，即 $m=127$，再随机选出127张矩阵进行投影，对静止的图案进行成像。将 k 从1逐渐增加，每次采样率约为6%，直接通过二阶关联测量就可以得到模糊图案。当 $k=5$ 时，图案就能重构出可接受质量的图案。通过5次模糊图像进行部分叠加得到新的图像，最后得到的图像如图4(b)所示。此时图4(b)和图4(a)的相关系数为0.6，说明所提方法可以对静止图案进行成像。



(a) 目标图案　　(b) 重构图案

图4　模拟仿真采用的目标图案和重构图案

为验证所提方法的有效性，将其与标准Hadamard单帧重建方法进行对比。假设目标图案在做匀速运动，每帧的时间间隔内在 x 和 y 方向上移动三个像素，将整个运动过程分为10帧，即 $J=10$。由于LED阵列高速的投影，目标图像在每个时间间隔内均可被视为是静止不动的。结果如图5。

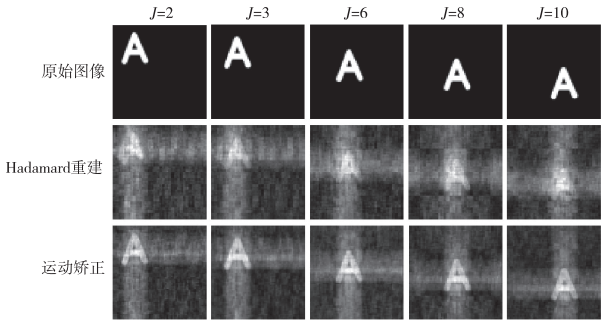


图5　原始图像与标准Hadamard重建方法的对比结果

使用对比噪声比(CNR)来衡量重构图案的质量，其数学表达式为：

$$CNR=\frac{\left|\mu_{\mathrm{roi}}-\mu_{\mathrm{bg}}\right|}{\sqrt{{\sigma_{\mathrm{roi}}}^2+{\sigma_{\mathrm{bg}}}^2}} \tag{6}$$

式中，μ_{roi} 是感兴趣区域的像素灰度均值，μ_{bg} 是背景区域的像素灰度均值，${\sigma_{\mathrm{roi}}}^2$ 和 ${\sigma_{\mathrm{bg}}}^2$ 分别是感兴趣区域像素灰度的方差和背景区域像素灰度的方差。CNR值越大，表明目标与背景之间的对比度相对于图像噪声水平越显著。

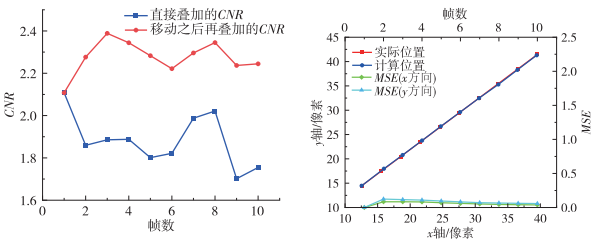
图6(a)展示了不同帧数下两种图像叠加方式所获得的 CNR 值对比情况，其中，蓝色曲线代表直接叠加方式的 CNR 变化，红色曲线对应本文提出的运动补偿叠加方法。可以看出，采用所提出的运动补偿叠加方法，其重构图像的CNR始终高于直接叠加方式。这说明在运动的情况下，所提出的方式能够有效提升图像质量，增强目标图像的可辨识性。

通过几何矩计算图案的质心，得到图案运动的轨迹，并利用均方根误差(MSE)来评估物体真实位置和计算位置之间的差异，其计算公式为：

$$MSE=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(t_i-e_i)^2 \tag{7}$$

式中，n 是样本数量，即帧数；t_i 表示物体的真实位置；e_i 表示通过算法计算得到的物体位置。MSE 值越小，说明计算得到的物体位置与真实位置越接近，定位精度越高。

原始图像的真实位置与计算位置之间在 x 方向和 y 方向上的 MSE 如图6(b)所示。在 x 方向上，MSE 值整体保持相对稳定，并且波动范围大致在0～0.2之间。这表明在 x 方向上，对物体位置的计算值与真实值较为接近，定位精度较高，受到帧数变化影响小。在 y 方向上，随着帧数的增加，MSE 值逐渐趋于平稳，逐渐趋于0.3。图6(b)表明，在该模拟条件下，所提方法对物体位置的计算在 x 和 y 方向都存在一定误差，但是误差相对较小，反映了对物体定位的准确性。

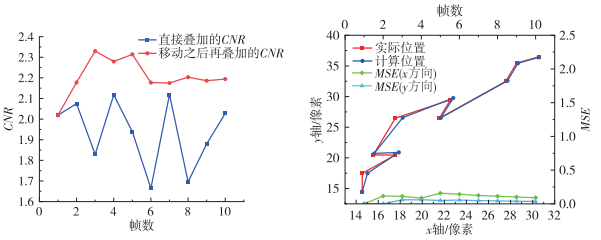


(a) 两种不同方法的对应的 CNR 变化曲线　　(b) 图像在运动补偿后沿 x 和 y 方向计算的质心的均方误差

图6　图像质量评估指标比较

考虑到图案进行速度变化的情况，图案每帧位移为方向和速度随机的0～4个像素，求得重构图像的 CNR 以及轨迹图如图7所示。

图7(a)表明采用所提出的运动补偿叠加方法，对于速度方向变化的图案其重构图像的 CNR 始终高于直接叠加方式。从图7(b)中可以看出，计算的运动轨迹和实际的运动轨迹基本一致。在 x 和 y 方向上，MSE 值都小于0.3，波动范围较低，说明计算



（a）两种不同方法的对应 *CNR*　（b）图像在运动补偿后沿 x 和 y 方向计算的质心的 *MSE*

图 7　图像质量评估指标比较

位置与真实位置的误差小且相对稳定。

3　基于 LED 阵列的单像素成像实验

搭建单像素成像实验系统，验证仿真结果。实验装置图如图 8 所示，LED 阵列的像素为 32 × 32 像素，尺寸为 44 mm × 44 mm，能够显示一系列照明图案。

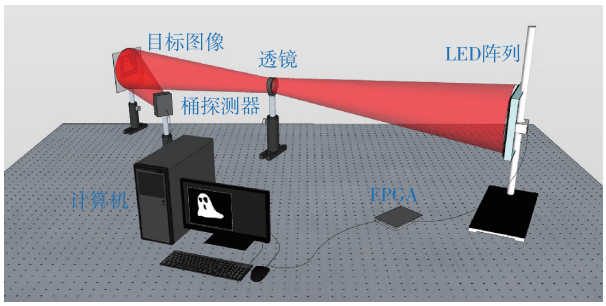


图 8　实验装置图

利用现场可编程门阵列（Field-Programmable Gate Array，Xilinx Artix-7 XC7A35T）和驱动电路来驱动 LED 阵列（Everligh，台北，中国，SMD 18038/RSGHBHC 1-S 02/2 T，红光波长 619～631 nm，1 mm×1 mm，20 mA，60 mW）。LED 阵列显示照明图案，经过透镜成像到物体表面，其反射光被桶探测器（PDA100A2-Si Switchable Gain Detector，320～1 100 nm，11 MHz BW，75.4 mm^2，Universal 8-32/M4 Taps）接收。用数据采集卡（NI PCI-6255）来记录桶探测器的电压信号，并且结合照明图案的信息来进行图像重建。由于实验所采用数据采集卡的采样率较低，无法匹配高速 LED 阵列投影产生的数据流。实验中，将 LED 阵列的照明图案显示速率降至 10 kHz，以确保采集的数据可靠。在成像实验中，图案尺寸大小为 44 mm × 44 mm，分辨率大小为 32 × 32 像素。如果要对图案进行全采样成像，对于一组完备的 32 阶的 Hadamard 矩阵，全采样时需要的散斑数为 1 024。鉴于 LED 阵列的限制，需要投影 4 096 个照明图案才能进行完备的成像。

为获得更快的成像速度，实验采用新投影方式，达到减少投影图案的数量，以更快获得图案的运动轨迹。先选择出 63 张特定的矩阵，即 m=63，再随机选择 63 张矩阵，投影图案为这两部分矩阵之和，采样率为 12.3%。但 LED 阵列实际所需投影图案为 378 张散斑矩阵，投影率为 9.228 5%，减少了达到同样采样率所需的投影次数，加快了成像速度。LED 阵列投影的一系列照明图案经过透镜之后照射到物体图案上，其反射光被桶探器接收。探测器接收的电压信号被数据采集器记录，通过关联测量重建物体图像。

目标图案进行方向速度未知的运动，经过重建后的结果如图 9 所示，取 k=5。图 9(a)中每帧图片为由 5 张模糊图案直接叠加的结果，图 9(b)则是利用循环选择投影的方法将模糊图片经过移动之后再叠加的结果，整个成像过程被分为 10 帧。从图中可以看出，通过分帧处理和移动调整，图案逐步清晰化，并成功捕捉到图案的运动轨迹。

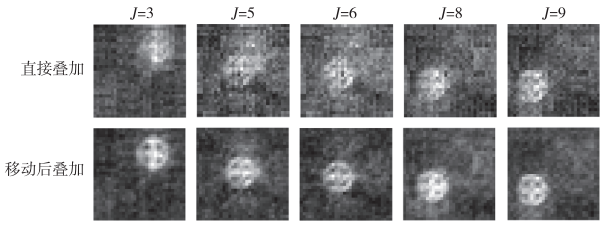
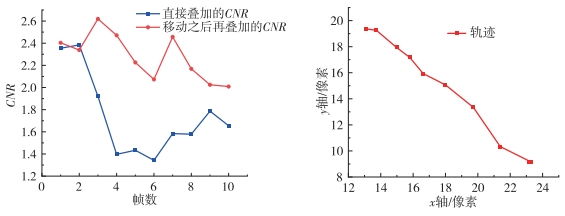


图 9　基于 LED 阵列的单像素成像实验结果图

由图 9 可知，所提出方法通过分帧处理和动态调整，显著提升了成像清晰度，并成功还原了图案的运动轨迹（如图 10(b)），而传统方法因未考虑位移导致效果较差。计算得到重构图像的 *CNR* 值如图 10(a)所示。从图中可知，在目标物体运动速度较慢的前两帧中，直接叠加与运动补偿叠加两种方法所得的 *CNR* 值差异较小。然而，随着物体运动速



（a）直接叠加得到的结果图　（b）移动后叠加得到的结果图

图 10　实验结果图

度的增加,运动补偿叠加方法所重构的图像*CNR*明显高于直接叠加方法,说明其图像质量更好。

这一结果进一步验证了所提出的运动补偿叠加策略在动态场景下的有效性。总体来看,本文方法在图像重构过程中表现出更高的对比噪声比,具有更强的鲁棒性与适应性。

4 结论

本文提出一种基于LED阵列的快速跟踪与成像的单像素成像方案。利用特定选择的Hadamard图案和低阶矩算法,大幅减少单帧成像所需的LED阵列投影张数。实验中,单次采样率为12.3%,单次投影率仅为9.228 5%。首先通过低阶矩计算模糊图像的质心,再根据质心位移逐步移动投影图案,从而恢复出高质量图像。采用投影速度为10 kHz的LED阵列和高速桶探测器时,系统能够恢复32×32像素的动态场景。由于投影率较低,可直接获得模糊图像,减少了计算时间。同时,该方案能够获取物体的运动轨迹,为单像素成像应用于运动物体提供一种更简洁的方法,具有实际应用价值。

参考文献:

[1] Strekalov D V, Erkmen B I, Yu N. Ghost imaging of space objects[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2013, 414: 012037.

[2] Yang M C, Wang P, Wu Y, et al. A ghost imaging framework based on laser mode speckle pattern for underwater environments[J]. Communications Engineering, 2024, 3: 52.

[3] Iqbal R, Abbas A, Jie C, et al. A comprehensive analysis of ghost imaging for remote sensing (GIRS): a review[J]. Optics & Laser Technology, 2025, 189: 112973.

[4] Zhao S, Wang L, Liang W, et al. High performance optical encryption based on computational ghost imaging with QR code and compressive sensing technique[J]. Optics Communications, 2015, 353: 90-95.

[5] Ma S, Liu Z, Wang C, et al. Ghost imaging LiDAR *via* sparsity constraints using push-broom scanning[J]. Optics Express, 2019, 27(9): 13219.

[6] Han S, Yu H, Shen X, et al. A review of ghost imaging *via* sparsity constraints[J]. Applied Sciences, 2018, 8(8): 1379.

[7] 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.

[8] Cecconi V, Kumar V, Pasquazi A, et al. Nonlinear field-control of terahertz waves in random media for spatiotemporal focusing[J]. Open Research Europe, 2023, 2: 32.

[9] Olivieri L, Peters L, Cecconi V, et al. Terahertz nonlinear ghost imaging *via* plane decomposition: toward near-field micro-volumetry[J]. ACS Photonics, 2023, 10(6): 1726-1734.

[10] Zhang A X, He Y H, Wu L A, et al. Tabletop X-ray ghost imaging with ultra-low radiation[J]. Optica, 2018, 5(4): 374-377.

[11] Lin L X, Cao J, Zhou D, et al. Ghost imaging through scattering medium by utilizing scattered light: publisher's note[J]. Optics Express, 2022, 30(13): 22819.

[12] Liu X, Hu J, Ju M, et al. Fast high quality computational ghost imaging based on saliency variable sampling detection[J]. Scientific Reports, 2024, 14: 7769.

[13] Jiao S, Sun M, 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.

[14] Song L, Zhou C, Chen L, et al. Demonstration of single pixel computational ghost imaging with pseudo-randomly patterned illumination from a liquid crystal display[J]. Selected Papers of the Chinese Society for Optical Engineering Conferences Held July 2016, 2016, 10141: 101411G.

[15] Xu Z H, Chen W, Penuelas J, et al. 1 000 fps computational ghost imaging using LED-based structured illumination[J]. Optics Express, 2018, 26(3): 2427.

[16] Yang Z, Li W, Song Z, et al. Tracking compensation in computational ghost imaging of moving objects[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(1): 85-91.

[17] Wu J, Hu L, Wang J. Fast tracking and imaging of a moving object with single-pixel imaging[J]. Optics Express, 2021, 29(26): 42589.

[18] Yang D, Chang C, Wu G, et al. Compressive ghost imaging of the moving object using the low-order moments[J]. Applied Sciences, 2020, 10(21): 7941.

[19] Huang H X, Li L J, Ma Y X, et al. 50k fps computational ghost imaging with an ultrafast LED array[J]. Proc. of SPIE, 2023, 12921: 129214N.

[20] Huang X, Nan S, Tan W, et al. Ghost imaging for detecting trembling with random temporal changing[J]. Optics Letters, 2020, 45(6): 1354-1357.

[21] 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.

[22] Xiao L, Wang J, et al. Single-pixel imaging of a randomly moving object[J]. Optics Express, 2022, 30(22): 40389.

作者简介:

潘 武(1966—),男,重庆市人,博士,教授,主要研究方向为太赫兹通信技术和超材料及其在太赫兹器件中的应用;

杨 桓(1992—),男,重庆市人,博士,讲师,主要研究方向为单像素成像和极弱光成像。