运动物体的桌面式 X 射线鬼影视频

Hui Zeng,[a,d,†] **Ming-Fei Li,**[c] 俞志跃,[b] 石秉展,[a,d] 吴晓静,[b] 冯杰,[a,d] **Jin-Guang Wang,**[c] **Yi-Fei Li,**[c,*] 吴令安,[c] 施建宏,[b,†,*] 陈利明[a,d,*]

[a]暗物质物理国家重点实验室、激光等离子体重点实验室（教育部）、物理与天文学院，上海交通大学，中国上海 200240[b]光子学与通信国家重点实验室、量子传感与信息处理研究所、自动化与智能感知学院，上海交通大学，中国上海 200240[c]北京凝聚态物理国家研究中心、物理研究所、中国科学院与中国科学院大学物理科学学院，中国北京 100190[d]IFSA协同创新中心，上海交通大学，中国上海 200240

摘要。X射线成像广泛应用于临床医学、工业检测以及各类科学研究领域。遗憾的是，目前大多数X射线二维（2D）探测器都面临像素数量与读出时间之间的根本性权衡，因此不适用于快速运动物体成像；此外，读出死时间还会导致帧丢失。X射线鬼成像（XGI）提供了一种替代方案，只需使用高灵敏度单像素探测器即可对物体成像。然而，现有XGI方法的一个关键局限是所需的总采集时间过长，因而难以用于实际应用。本文提出一种快速空间调制方案，将随机二值图案编码到快速旋转掩模上。我们实现了对运动物体的清晰X射线可视化，成像速率最高可达每秒200帧，分辨率为225 μm。我们的方法首次大幅提升了XGI的成像速度，为X射线成像应用于运动物体开辟了道路，例如旋转航空发动机检测和活体医学成像。

关键词：鬼成像、X射线成像、运动物体成像、快速空间调制。

*所有通信请联系 Yi-Fei Li，yflx@iphy.ac.cn；施建宏，purewater@sjtu.edu.cn；陈利明，lmchen@sjtu.edu.cn

†这些作者对本研究的贡献相同。

1 引言

X射线成像凭借其高穿透能力和高分辨率特性，是医学、晶体学、无损检测及许多其他领域中不可替代的工具。传统的

直接投影成像依赖于读取二维（2D）探测器接收到的透射X射线强度。然而，与用于其他电磁波波长的像素化相机类似，X射线探测器面临像素数量与读出时间之间的根本性权衡：其占空比通常较低，即读出所需时间远长于信号积分时间，这通常使其应用局限于静态物体。例如，1024×1024 像素的 Andor X射线相机帧率通常为 ~4.4 帧每秒（fps）[1]。高分辨率必然导致较低的帧率，而更快的探测器往往分辨率较差或视场（FOV）较小[2,3]。即使技术不断进步，配备快速电子快门的探测器仍面临帧率有限、视场较小且成本高昂的问题[4,5]。例如，目前某些所谓的超快X射线相机在硬X射线成像中可实现 MHz 级帧率，但由于片上存储限制，每次突发（数据采集突发）最多只能采集约 128 帧，且数据传输的读出速度较慢[6]。因此，开发一种兼具高空间分辨率和高帧率、易于使用的X射线成像探测器，仍是一项艰巨挑战。

鉴于上述问题，鬼成像（GI）[7–9]仅使用单像素探测器（SPD）记录物体信息，因此可为此提供一种前景广阔的解决方案。GI 的优势在于能够在极低照度下成像[10,11]，、在湍流环境中具有鲁棒性[12]，、提高空间分辨率并实现高信噪比（SNR）[13–15]。然而，该技术需要依次使用一系列不同的空间调制图案照射样品，然后对物体透射光或反射光与各调制图案之间相应的关联进行平均。这一漫长的曝光过程，以及数据累积和计算时间，都是显而易见的缺点。不过，近期已有研究提出并展示了几种基于旋转掩模的高速调制方案，可用于在可见光波长下对运动物体进行单像素成像[16–20]。

一般而言，鬼成像适用于任何波长，且已在整个光谱范围内实现，从微波[21] 到太赫兹[22,23]，、硬X射线[10,13,24,25]，，甚至原子[26,27]，、电子[28,29]，和中子[30–33]。与可见光和近红外相比，X射线鬼成像研究起步较晚。主要困难在于缺乏适用于聚焦和强度调制的光学器件。为解决这一问题，人们提出了两种实验方案：一种是利用晶体作为分束器，这通常需要高通量X射线源[25,34–36]；另一种是使用由高吸收材料制成的调制掩模，生成一系列

强度调制二维图案来照射物体，例如砂纸[10]、、铜[13]、、金[13]、、复印纸[34]、、玻璃[36]或金属粉末[35]。X射线鬼成像的多种形式，例如X射线计算机断层成像[35]、、相位衬度成像[37,38]、、荧光透视[39–41] 和吸收光谱[42]，均已得到验证。同时，一些采用并行鬼成像方案来扩大成像视场并提高分辨率的研究也取得了成功[30,43–46]。然而，在上述方案中对离散图案进行调制，导致逐一曝光所有测量图案所需的总时间相对较长，可能长达数小时。首个针对运动物体的X射线鬼成像实验通过使用砂纸引入预先记录的强度波动[47]得以实现。不过，该研究所述的过程和结果仍需要很长的采样时间，且仅适用于有限范围，即对周期性运动物体成像。在我们之前的工作中[48]，，我们通过将循环S矩阵重塑为聚合图案并进行连续平移扫描，实现了一种快速X射线鬼成像方案，将成像时间缩短至数秒量级。然而，由于调制速度有限，实时动态成像仍具挑战性。

在本研究中，我们提出了一种新方法，将旋转圆盘调制与压缩感知（CS）相结合，实现运动物体的二维高分辨率X射线鬼成像[49]，，展示了高达 204.8 kHz 的图案调制速率。该方案基于特别设计的旋转环形二值掩模，其上带有循环随机图案。在一次旋转过程中，掩模以一系列调制模式照射物体，从而能够重建一幅图像。因此，成像帧率由旋转速度决定，且与旋转速度相等。在本研究中，掩模由高速电机驱动，以最高每秒 200 转（rps）的恒定速度旋转，实现了对 1024 像素图像进行 200 fps 成像。通过该方案，成功对旋转靶标上的字母进行了成像和记录。

2 材料与方法

2.1 实验装置

实验装置如图1所示。将X射线管（Incoatec Source IusCu）设置为35 kV、800 μA，作为光源。在管子下游放置一个尺寸为5.6×5.6 mm2的钨孔径光阑，以确保只有编码掩模的一个图案受到照射。考虑到光束略有发散，孔径光阑与

掩模之间的距离设为15 cm，从而将约7.2×7.2 mm2的方形光束投射到调制图案的一个子区域上。通过电机驱动掩模以恒定速度连续旋转，转速为200转/秒；每转的最大抖动为0.04%。物体是一块铜盘，上面以环形排列的方式刻有各种字母；将其尽可能靠近掩模放置（距离为~4 cm），以最大限度地减少未准直光束造成的编码图案模糊。随着掩模和物体旋转，字母依次受到掩模图案不同区段的照射。随后，使用经济型X射线SPD（North Night Vision Technology，南京，M3021型）实时测量透过物体的总强度。该探测器由碘化钠闪烁体、光电倍增管、高压模块和前置放大器组成。对于能量范围为5–100 keV的X射线，该探测器的有效探测直径为25 mm，探测效率为82%，响应时间约为2 μs。其工作电压设为650 V。为使编码图案与透射信号同步，在掩模两侧相对位置对齐安装一个发光二极管（LED）和一个光电二极管（PD）；掩模边缘有一个缺口，因此每旋转一周，PD都能接收到来自LED的一个光脉冲。数据采集卡（TiePie Handyscope HS6示波器）同步记录SPD的透射信号和PD信号，采集波动的电压-时间信号并将其传输至计算机。采样频率设为1 MHz，以确保采集到所有到达探测器的光子。将编码图案与相应的电压信号进行关联后，即可重建物体图像。此外，还使用X射线 sCMOS 相机（Photonic Science Large Area VHR22M_125，像素尺寸为25 μm，配备厚度为250 μm的碘化铯闪烁体）拍摄物体圆盘的常规照片。

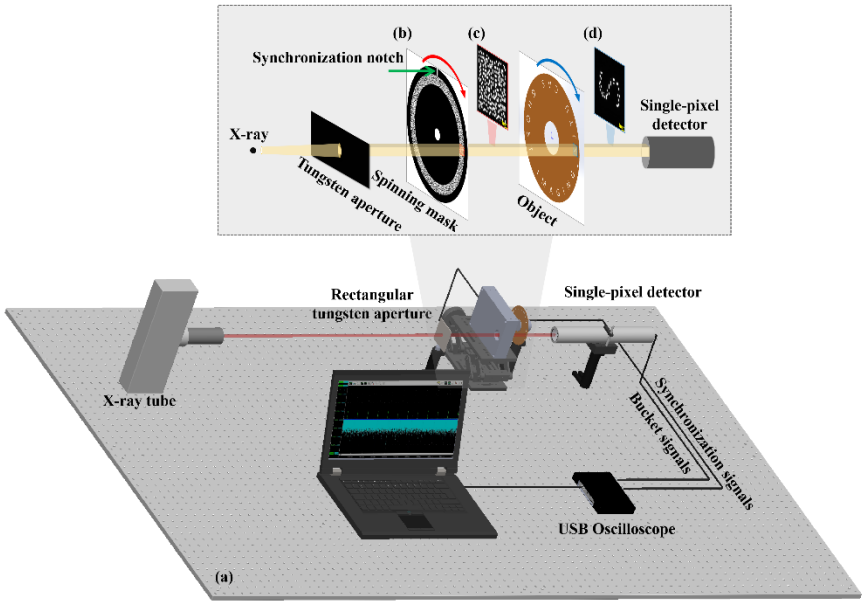

图 1 实验装置示意图。(a) 整体装置。(b) 旋转编码掩模。红色方框表示成像区域，绿色箭头表示同步缺口。(c) 和 (d) 分别为 X射线 sCMOS 相机记录的掩模正后方和物体后方的光束强度分布。

2.2 旋转编码掩模

调制掩模的设计如图2(a)所示。如图2(b)所示，矩形随机二进制编码被压缩为一个聚合图案，其中25%的像素透光（1），75%的像素遮光（0），像素尺寸为32×1024，随后在厚度为500 μm的黄铜圆盘上以圆形图案进行镂刻。值得注意的是，每当扫描区域向前移动一个像素，就会照亮一个新的图案；图2(b)和(c)中的三个图案分别以红色、绿色和黄色虚线框标出。随机矩阵图案的优点在于，应用压缩感知算法时无需进行降采样[50,51]。成像空间分辨率由图案单元的尺寸决定；在我们的掩模中，该尺寸为225 μm。圆盘的厚度为0.5 mm，足以显著吸收能量高达35 keV的X射线光子。实际上，掩模的强度调制不可能严格为0或1，因为它取决于材料的吸收特性，因此必须测量实际调制深度；该深度决定了最终图像的对比噪声比（CNR）[52,53]。具体测量方法是：在光束完全无遮挡时，使用SPD测量视场为7.2×7.2 mm2内的总强度，然后测量光束穿过黄铜掩模未编码部分后的强度。根据图2(d)所示结果，我们

计算得出调制深度约为98.93%，远高于参考文献48中的数值。

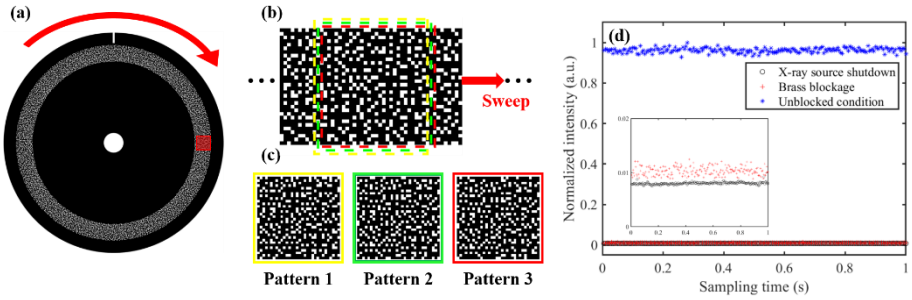

图 2 调制掩模。（a）环形调制掩模。红色箭头表示自旋方向，红色方框表示经过孔径后被照亮的հատված。（b）帧尺寸为 32×32像素时调制图案扫描示意图，彩色方框表示依次采样的图案。红色箭头表示扫描方向。（c）三个具有代表性的连续编码图案。（d）SPD 测得的归一化强度：X 射线束完全未被阻挡时（顶部蓝色星号），以及光束通过黄铜掩模的未编码部分时（底部红色“+”）。探测器的采样时间和频率分别为 1 s 和 1 MHz。每次积分时间为 5 ms。

3 结果与讨论

3.1 静态物体成像

我们首先使用掩模对处于静止状态的物体进行X射线鬼成像；结果如图3所示，其中物体见图3(a)；模板刻出的字母为“GHOST IMAGING SJTU CAS”。图3(b1)–(b4)展示了由sCMOS相机拍摄的部分字母的投影图像，下方一行的图3(c1)–(c4)则展示了通过X射线鬼成像重建得到的图像。白色区域对应于X射线完全透过物体镂空部分的区域。在X射线鬼成像过程中，编码掩模以200 Hz的速度旋转。为定量评估重建XGI图像的质量，计算了CNR（其定义见补充说明1）[53],，并将其显示在图3(c1)–(c4)的左上角。图像重建方法见附录A。投影图像和XGI图像均在相同的X射线源参数和总曝光时间（即1 s）下获取。图3(c1)–(c4)中绿色垂直线和红色水平线标记的横截面的归一化强度绘制于图3(d1)–(d4)中。通过

测量图像边缘附近横截面斜率的半高宽[45]，，估算得到水平方向和垂直方向的空间分辨率约为225 μ m，如图3(e)所示；这一结果与调制像素的225 μ m宽度吻合良好。此外，相应的灰度成像结果见补充说明2。

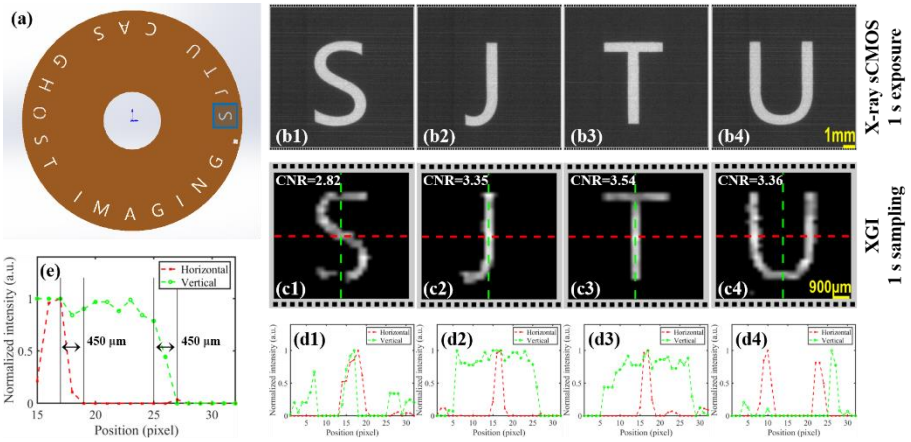

图 3 静态物体的实验结果。(a) 物体圆盘的照片；蓝色方框表示感兴趣区域。(b) sCMOS相机以 1 s 曝光时间拍摄的静态物体部分区域的投影X射线图像。(c) 采样时间同为 1 s 时重建的X射线鬼成像图像；对应的CNR值显示在左上角。(d) 沿图 3(c) 中红线和绿线的归一化强度剖面。(e) 图 3(d2) 中一段内容的详细放大视图。

不同的总采样时间对应不同的光子总数。为探究光子计数对对比噪声比的影响，我们将每次重建的采样时间从 50 ms 调整至 20 s。重建图像见图 4(a)–(f)，相应的 CNR 曲线见图 4(g) 和 (h)。逐行分析图像可见，采样时间从 50 ms 增加至 1 s 时，由于信号光子数量增加，CNR 显著提高。然而，从 1 s 增至 20 s 时，CNR 几乎没有变化，CNR值趋于饱和。

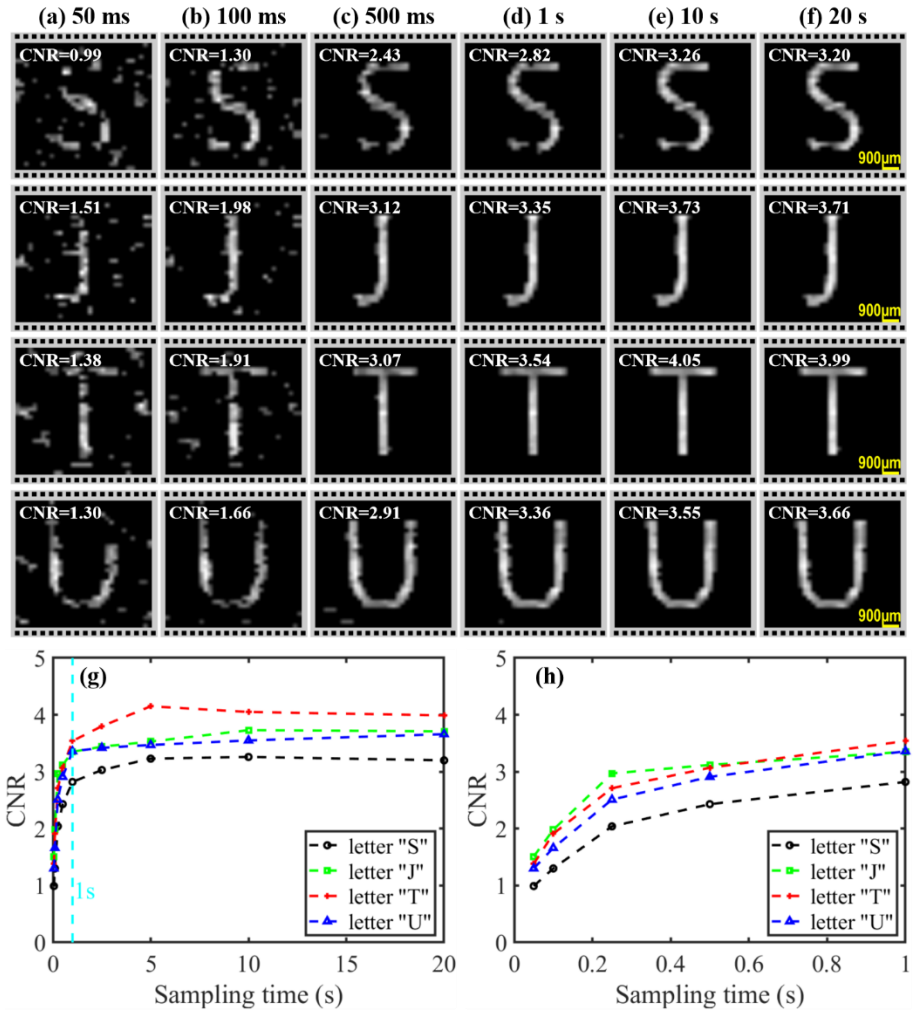

图 4 不同采样时间下的图像重建对比。(a)–(f) 不同采样时间（50 ms 至 20 s）下由 X射线鬼成像获得的图像。(g) 与图 (a)–(f) 对应的 CNR曲线。(h) 图 4(g) 中 50 ms 至 1 s 范围的详细放大视图。

3.2 旋转物体的动态视频

镂空物体圆盘由电机驱动，以 1/256、1/64、1/16 和 1/4 转/秒的恒定速度旋转；由于字母距圆心 4.75 cm，这相当于字母分别以约 0.12、0.48、1.92 和 7.68 cm/s 的速度垂直向下移动。我们采用 1024 个尺寸为 32×32 像素的矩形照明图案进行成像。不同物体速度下完整拍摄的视频见视频 S1-S7。调制掩模以 200 转/秒的速度旋转，因此所有视频均以 200 fps 的成像速度重建，且没有死时间；每段视频中选取的帧如图所示

图5(a)–(d)，捕获视频的完整细节见补充材料中的注释3。我们方案的一个关键限制是有效X射线光子通量；台式X射线源的光子通量有限（物平面处约为105 photons/mm2·s），导致短采样间隔内X射线强度的调制波动较小，难以检测。此外，在采样时长较短时，随机宇宙射线、背景光子和读出电路产生的噪声会降低图像质量。为在低通量条件下实现调制并提高成像信噪比，仍有必要叠加多个调制周期。同时，我们开发了一种运动补偿算法（详见附录A），用于校正调制矩阵与桶信号之间的错位，从而消除运动模糊效应。补充注释4展示了运动补偿在减少运动模糊和提升图像质量方面的优势。

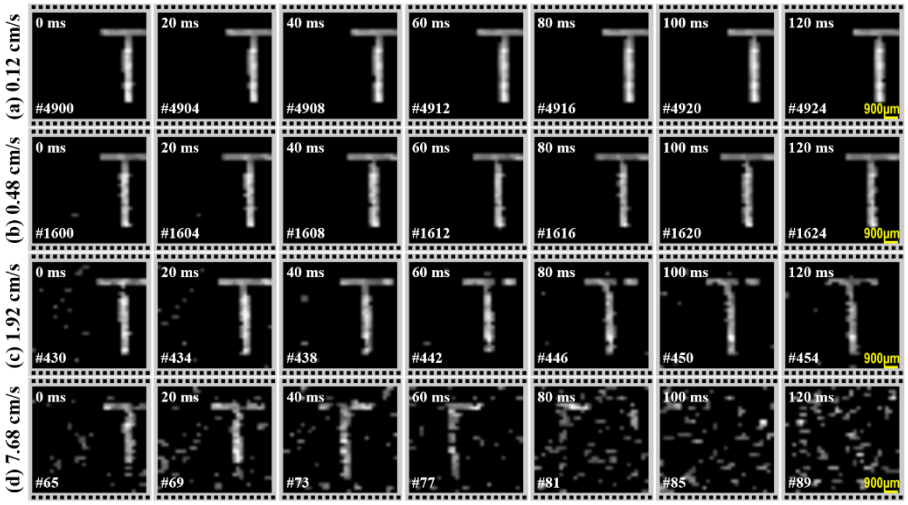

图5 移动的字母T的X射线鬼成像视频截图。(a)–(d)物体速度分别为0.12、0.48、1.92和7.68 cm/s；视频帧的序号显示在每幅图像的左下角。

对图5各列中的图像进行比较可以发现，随着物体速度从0.12 cm/s增至7.68 cm/s，整体图像质量逐渐下降。这是由于物体在视场内的驻留时间缩短所致；如图5(d)所示，速度为7.68 cm/s的物体穿过7.2 mm视场时，驻留时间仅约为90 ms，这也减少了可进行的叠加周期数。通过提高光源强度和/或提升探测器响应速度，可以实现对更快运动物体的高质量成像。此外，一旦光源通量和采样频率

得到优化，就可以通过提高掩模旋转速度来提升成像帧率，前提是探测器能够检测到足够数量的光子。除光源强度和探测系统外，另一个可能限制成像质量的因素是掩模旋转速度不稳定，或掩模相对于电机轴发生偏轴偏移。降低采样率（定义为所用采样模式数量与模式总数之比）是进一步提高成像速率的另一种方法。正如补充材料注释5所述，随机矩阵的优势在于能够使压缩感知重建出高质量图像。即使存在信号截断，仅使用25%甚至12.5%的测量数据时，物体仍清晰可见。相应地，只需使用1/8的采样矩阵并采用压缩感知算法重建图像，成像速率至少可提高8倍（即最高可达1.6 kfps）。

3.3 与阵列相机成像的比较

为评估本系统在运动物体成像方面独特的无死时间视频记录能力，我们开展了实验，将其性能与传统的基于投影的相机进行比较。为确保公平比较，8×8 对X射线 sCMOS 相机进行片上合并，使其分辨率达到200 μm，与我们的XGI系统的225 μm分辨率相当。相应地，相机的成像帧率从1 fps提高到8 fps。图6(a)展示了从帧率为200 fps的X射线鬼成像视频中提取的字母GHOST，而图6(b)和图6(c)则展示了sCMOS相机以5 ms曝光拍摄的字母连续帧。如图6(b)所示，阵列相机能够拍摄清晰度很高的图像，但每次曝光后都需要读出时间，因此会出现帧丢失。这种由死时间造成的帧丢失问题在大多数常用阵列相机中普遍存在，导致记录不完整，并可能丢失关键信息。图6(c)对此进行了说明，其中物体速度提高至15.36 cm/s。图6(d)和图6(e)还提供了与一种常用的1024×1024像素（像素尺寸为13 μm）Andor iKon-M SO X射线电荷耦合器件的比较；采用 16×16 合并后，帧率从4.4 fps提高到25 fps，对应的成像分辨率为 208 μm。从这些比较可以得出，随着成像速率提高，捕获的信息会更加丰富，但帧丢失仍不可避免。更多不同物体速度下的比较见补充材料中的注6。相比之下，我们的XGI系统可进行连续测量，从而实现完整记录

所有运动字母，尽管成像质量相对较差，这主要是因为我们使用的辐射通量较低。另需指出，当前阵列相机的图像处理时间受像素数量限制，因此合并能够提高成像速度并改善信噪比，但会降低分辨率。

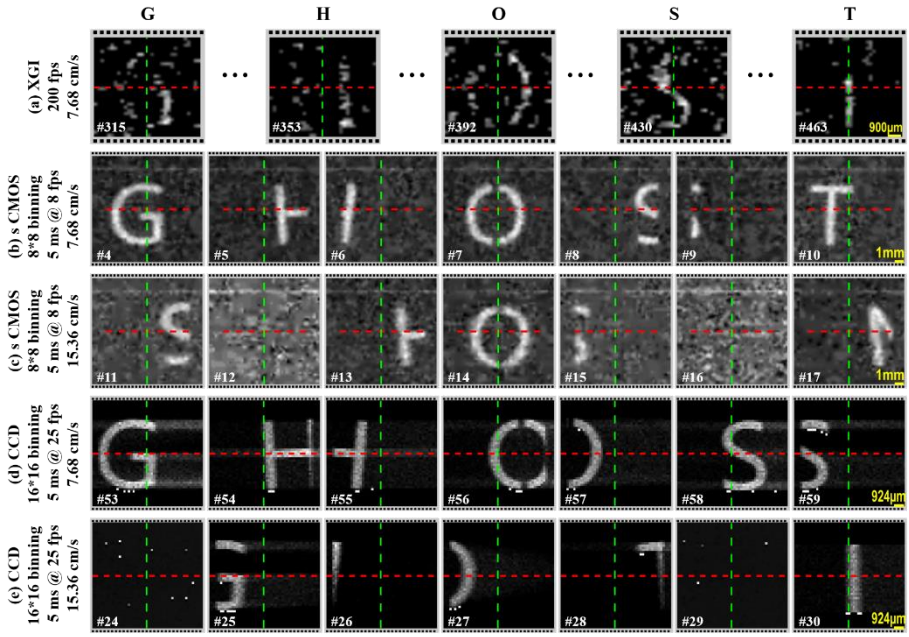

图 6 阵列相机不可避免的死时间导致的帧丢失现象。(a) 当物体速度为 7.68 cm/s 时，由我们的 X射线鬼成像相机重建的视频中选取的部分帧。(b) 和 (c) 分别为 sCMOS相机在速度为 7.68 cm/s 和 15.36 cm/s 时捕获的若干连续帧。(d) 和 (e) 分别为与图 6(b) 和 (c) 对应的 Andor 电荷耦合器件结果。红色和绿色虚线表示视场中心。

4 结论

总之，我们开发了一种能够对快速运动物体进行高分辨率成像的X射线鬼成像系统。通过旋转编码有随机二进制图案的黄铜环形掩模，实现了高达204.8千像素/秒的快速空间调制，从而将成像时间缩短至数毫秒。接近1的调制深度使我们能够使用简单的台式X射线源获得对比噪声比显著更高的图像。系统实现了最高200帧/秒的视频速率成像，使我们能够捕捉速度高达7.68厘米/秒的运动物体。本文所述的方法和结果为研究动态过程开辟了新的可能性。

原则上，我们的方法的成像速度主要受掩模旋转速度以及探测系统带宽（即采样频率）的限制。目前，成像速率受实验中所用X射线通量的制约；提高辐射源强度可以进一步提升成像速率，但更理想的做法是提高探测器灵敏度和响应速度。此外，对于空间分辨率至关重要的特定应用，可通过减小调制图案像素尺寸来提高空间分辨率。借助微纳加工和高精度光刻技术，在保持高调制深度的同时实现纳米级分辨率和较大的像素数量，在不久的将来应当是可行的；选择具有较高X射线吸收特性的调制材料也是一种可行方案。优化这些参数将有助于进一步提升性能。

值得注意的是，我们提出的方法不受波长限制，但尤其适用于阵列相机笨重、价格极其昂贵且难以维护的场景。具体而言，与其他现有的运动物体X射线成像技术相比，我们的方法可以使用常规台式X射线源实现。该装置简单、成本相对较低且易于操作。因此，我们的方法在存在物理运动的医学成像应用（例如无创心脏成像）以及运动机械部件的无损成像中具有巨大潜力，例如高速旋转的航空发动机和涡轮叶片。

附录A：重建方法

A.1 图像算法

随机采样在信号采集中天然具有高效、通用和稳健的特性[50,51]。在我们的工作中，我们采用随机二进制编码作为采样矩阵，从而能够通过压缩感知算法重建高质量图像[49]。这里，我们采用增广拉格朗日和基于交替方向的全变分算法TVAL3[54] 来重建图像：

$$\min_{\mathrm{x}} \sum_i \|D_i \mathbf{x}\|_2 + \frac{\mu}{2}\|\boldsymbol{A}\mathbf{x} - \boldsymbol{b}\|_2^2, \quad s.t. \quad \mathbf{x} \geq 0,$$

其中，$\|\mathbf{x}\|_2$ 是向量$\mathbf{x}$的l_2 范数，$\mathbf{x} = [x_1,\ldots\ldots x_n]^T$ 表示估计对象向量，$\mathbf{b} = [b_1,\ldots\ldots b_m]^T$ ($m \leq n$)表示在给定调制次数下积分得到的桶探测器强度，A 是

大小为$m\times n$的调制矩阵，$\mu>0$ 是二次保真项的惩罚参数，$D_i\mathbf{x}$ 是$\mathbf{x}$的离散梯度的第 i^{th} 个分量，$\sum\|D_i\mathbf{x}\|_2$ 表示全变差。保真项$\|\boldsymbol{A}\mathbf{x}-\mathbf{b}\|_2^2$ 将估计值与测量值之间的差异最小化，而全变差则同时去除图像噪声并保留边缘信息。

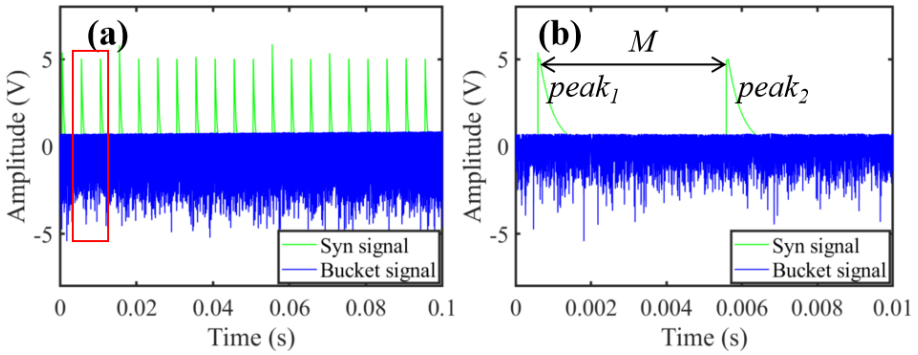

图7 典型的桶信号（蓝色）和同步信号（绿色尖峰）。(a) 包含20个调制周期的数据序列。(b) (a)中红框部分的放大视图，显示了2个同步脉冲。

在我们的实验中，掩模的旋转速度固定为200 Hz，探测器采样速度为1 MHz。图7展示了采集系统记录的桶信号和同步信号的典型示例。每两个相邻同步信号尖峰之间的数据对应于掩模完整旋转一周期间的一组连续调制信号，如图7(b)所示。为将这些数据高效地转换为包含1024个像素的图像，我们采用插值操作，然后将插值后的数据均匀分配到桶信号 b 中，这些桶信号对应于1024个顺序调制矩阵。为提高重建图像的信噪比，我们在重建算法中引入了一种数据复用方法。我们对后续周期性数据重复上述处理步骤，并将每个周期内对应的桶信号求和，以获得最终的桶信号值。

A.2 运动补偿

掩模与物体之间的相对运动会导致调制矩阵 A 与桶信号 b 之间发生错位，从而在基于数据复用的重建图像中引入运动模糊效应，因此对其进行补偿十分重要。在我们的实验中，当成像物体处于静止状态时，数据采集卡在掩模旋转一周期间记录M 个点。对于运动物体，物体与掩模沿

相同方向旋转，且物体速度（v_{obj}）为掩模速度（v_{mask}）的$1/k$。这意味着测量周期变长。当掩模完成一周旋转时，相对于静止状态，采集卡收集的相应数据增加了$1/k$ 的偏移量（即，$M+$（M k）/ ），当叠加多个周期以提高信噪比时，这会导致图像重建中出现运动模糊。因此，必须对该偏移量进行补偿，以使 1024 个调制模式与每个物体字母桶信号重新对齐。

在图像重建框架中，集成了运动补偿算法，以重新对齐桶信号 b。如图7所示，同步信号脉冲（绿色曲线）提供了关键的时间标记（例如，$peak_1$、$peak_2$、$peak_3$.....），用于定义名义调制周期。补偿算法如下运行：

（1）当掩模转速固定为 200 Hz，即 $v_{mask}=200$ 转/秒，且物体速度为 v_{obj}（例如 0.5 转/秒）时，k 等于：

$$k=\frac{v_{mask}}{v_{Obj}}=400,$$

（2）完整调制（例如，$M=peak_2-peak_1$）的名义调制周期 M 直接从同步信号中提取。

（3）由于相对运动，每个名义周期内与物体调制对应的实际数据段需要进行偏移才能提取。相对于名义峰值位置，每个周期的数据提取向后偏移 M/k。因此，实际调制周期的边界定义为：

周期 1：$(peak_1)$~$(peak_2+(M/k))$; 周期 2：$(peak_2+(M/k))$~$(peak_3+2\times(M/k))$; 周期 3：$(peak_3+2\times(M/k))\sim(peak_4+3\times(M/k))$;

周期 N：$(peak_N+(N-1)\times(M/k))\sim(peak_{N+1}+N\times(M/k))$;
依此类推。

(4) 每次帧重建的最终桶信号 b，由周期 1 与后续周期（例如周期 2、周期 3，.....周期 N）逐位求和得到。其中，N 由物体在视场内的驻留时间决定。

这种补偿不仅消除了运动模糊，还提高了成像信噪比。

利益披露

作者声明，不存在可能影响本研究客观性或本文撰写的财务利益、商业关联或其他潜在利益冲突。

代码、数据和材料可用性

本文所呈现结果的相关数据目前尚未公开，但可在合理请求后向作者获取。

致谢

本研究得到国家自然科学基金委员会（12335016、W2412039、11991073、12305272）和中国科学院战略性先导科技专项（XDA25030400、XDA25010100 和 XDA25010500）的资助。实验在北京协同极端条件用户设施（SECUF, http://cstr.cn/31123.02.SECUF.D3）开展。

参考文献

1. “用于X射线和极紫外探测的CCD、科学级互补金属氧化物半导体及电子倍增电荷耦合器件相机——Andor”，牛津仪器，< https://andor.oxinst.com/products/cameras-for-x-ray-euv-electron-and-neutron-detection>（访问于2025年7月15日）。2. I. Ordavo 等，“一种基于pn电荷耦合器件的新型彩色X射线相机，可实现快速空间和能量分辨测量”，《Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment》654(1), 250–257（2011年）[doi:10.1016/j.nima.2011.05.080]。3. A. Rack、M. Scheel 和 A. N. Danilewsky，“不规则硅晶圆破裂的实时直接X射线成像与衍射成像”，IUCrJ 3(2), 108–114（2016年）[doi:10.1107/S205225251502271X]。4. B. R. Halls 等，“喷雾破碎与雾化的高速二维同步辐射白光束X射线照相”，Opt. Express 25(2), 1605（2017年）[doi:10.1364/OE.25.001605]。

5. H. T. Philipp 等，“用于同步辐射束团分离的高速X射线成像像素阵列探测器”，J Synchrotron Rad 23(2), 395–403（2016年）[doi:10.1107/S1600577515022754]。6. M. P. Olbinado 等，“利用同步辐射实现MHz帧率硬X射线相衬成像”，Opt. Express 25(12), 13857（2017年）[doi:10.1364/OE.25.013857]。7. R. S. Bennink、S. J. Bentley 和 R. W. Boyd，“利用经典光源进行‘双光子’符合成像”，Phys. Rev. Lett. 89(11), 113601（2002年）[doi:10.1103/PhysRevLett.89.113601]。8. F. Ferri 等，“热光高分辨率鬼成像与鬼衍射实验”，Phys. Rev. Lett. 94(18), 183602（2005年）[doi:10.1103/PhysRevLett.94.183602]。9. A. Valencia 等，“热光双光子成像”，Phys. Rev. Lett. 94(6), 063601（2005年）[doi:10.1103/PhysRevLett.94.063601]。10. A.-X. Zhang 等，“超低辐射桌面式X射线鬼成像”，Optica 5(4), 374（2018年）[doi:10.1364/OPTICA.5.000374]。11. T. J. Lane 和 D. Ratner，“鬼成像有哪些优势？X射线与电子成像中的复用”，Opt. Express 28(5), 5898（2020年）[doi:10.1364/OE.379503]。12. J. Cheng，“湍流大气中的鬼成像”，Opt. Express 17(10), 7916（2009年）[doi:10.1364/OE.17.007916]。13. Y.-H. He 等，“利用单像素探测器实现高分辨率欠采样非相干X射线成像”，APL Photonics 5(5), 056102（2020年）[doi:10.1063/1.5140322]。14. F. Li 等，“通过散斑照明的高阶关联实现超越亚瑞利成像”，J. Opt. 21(11), 115604（2019年）[doi:10.1088/2040-8986/ab48d4]。15. J.-E. Oh 等，“利用散斑照明实现亚瑞利成像”，Opt. Lett., OL 38(5), 682–684，Optica出版集团（2013年）[doi:10.1364/OL.38.000682]。16. E. Hahamovich 等，“利用循环哈达玛掩模以兆赫兹切换速率进行单像素成像”，Nat Commun 12(1), 4516（2021年）[doi:10.1038/s41467-021-24850-x]。17. W. Jiang 等，“基于旋转掩模的单像素相机”，Opt. Lett. 46(19), 4859（2021年）[doi:10.1364/OL.431848]。18. P. Kilcullen、T. Ozaki 和 J. Liang，“通过扫描聚合图案实现压缩超高速单像素成像”，Nat Commun 13(1), 7879（2022年）[doi:10.1038/s41467-022- 35585-8]。

19. W. Jiang 等，“使用单像素探测器对周期性或可重复场景进行每秒200万帧的二维和三维成像”，Photon. Res. 10(9), 2157（2022年）[doi:10.1364/PRJ.461064]。20. S. Bie 等，“利用循环哈达玛掩模在纠缠光子照明下进行单像素量子成像”，《科学进展》（2025年）。21. A. V. Diebold 等，“利用动态超表面孔径在微波频率下进行无相位计算鬼成像”，Appl. Opt. 57(9), 2142（2018年）[doi:10.1364/AO.57.002142]。22. C. M. Watts 等，“利用超材料空间光调制器进行太赫兹压缩成像”，Nature Photon 8(8), 605–609（2014年）[doi:10.1038/nphoton.2014.139]。23. L. Olivieri 等，“时间分辨非线性鬼成像”，《ACS光子学》5(8), 3379–3388（2018年）[doi:10.1021/acsphotonics.8b00653]。24. H. Yu 等，“利用硬X射线进行傅里叶变换鬼成像”，Phys. Rev. Lett. 117(11), 113901（2016年）[doi:10.1103/PhysRevLett.117.113901]。25. D. Pelliccia 等，“实验性X射线鬼成像”，Phys. Rev. Lett. 117(11), 113902（2016年）[doi:10.1103/PhysRevLett.117.113902]。26. R. I. Khakimov 等，“原子鬼成像”，Nature 540(7631), 100–103（2016年）[doi:10.1038/nature20154]。27. S. S. Hodgman 等，“超冷原子的高阶量子鬼成像”，Phys. Rev. Lett. 122(23), 233601（2019年）[doi:10.1103/PhysRevLett.122.233601]。28. S. Li 等，“电子鬼成像”，Phys. Rev. Lett. 121(11), 114801（2018年）[doi:10.1103/PhysRevLett.121.114801]。29. A. Trimeche 等，“离子和电子鬼成像”，Phys. Rev. Research 2(4), 043295（2020年）[doi:10.1103/PhysRevResearch.2.043295]。30. A. M. Kingston 等，“中子鬼成像”，Phys. Rev. A 101(5), 053844（2020年）[doi:10.1103/PhysRevA.101.053844]。31. Y.-H. He 等，“利用中子进行单像素成像”，《科学通报》66(2), 133–138（2021年）[doi:10.1016/j.scib.2020.09.030]。32. J.-T. Xie, J.-H. Tan, S.-L. Wang, Y.-F. Li, C.-Q. Zhu, L.-M. Chen, L.-A. Wu, M.-F. Li, Z.- R. Zeng 和 T.-J. Liang，“通过共振中子鬼成像实现同步成像和元素区分”，Front. Phys. 20(3), 32203（2025年）[doi:10.15302/frontphys.2025.032203]。

33. C. Cheng 等，“一种利用中子诱发伽马射线活化的单像素元素成像方法”，NUCL SCI TECH 36(1), 2（2025年）[doi:10.1007/s41365-024-01544-9]。34. A. Schori 和 S. Shwartz，“利用实验室光源进行X射线鬼成像”，Opt. Express 25(13), 14822（2017年）[doi:10.1364/OE.25.014822]。35. Andrew. M. Kingston 等，“鬼成像断层摄影”，Optica 5(12), 1516（2018年）[doi:10.1364/OPTICA.5.001516]。36. D. Pelliccia 等，“迈向利用同步辐射光实现X射线鬼成像的实用方案”，IUCrJ 5(4), 428–438（2018年）[doi:10.1107/S205225251800711X]。37. D. Ceddia 和 D. M. Paganin，“关于随机矩阵基、鬼成像和X射线相衬计算鬼成像”，Phys. Rev. A 97(6), 062119（2018年）[doi:10.1103/PhysRevA.97.062119]。38. M. P. Olbinado 等，“利用单像素相机进行X射线相衬鬼成像”，Optica 8(12), 1538（2021年）[doi:10.1364/OPTICA.437481]。39. Y. Klein 等，“通过X射线计算鬼荧光成像进行化学元素映射”，Optica 9(1), 63（2022年）[doi:10.1364/OPTICA.441682]。40. M. Manni 等，“基于同步辐射的X射线荧光鬼成像”，Opt. Lett. 48(23), 6271（2023年）[doi:10.1364/OL.499046]。41. P. Meyer 和 T. Salditt，“基于编码孔径鬼成像的全场X射线荧光成像”，Opt. Express 33(20), 41802（2025年）[doi:10.1364/OE.570310]。42. J.-T. Xie 等，“通过能量分辨X射线吸收鬼成像实现同步成像和元素区分”，Opt. Lett. 49(15), 4162（2024年）[doi:10.1364/OL.527457]。43. H. Zhang 等，“利用物臂中的分箱探测器进行百万像素X射线鬼成像”，Chin. Opt. Lett. 20(3), 033401（2022年）[doi:10.3788/COL202220.033401]。44. C.-Z. Zhao 等，“利用专门研制的分束器进行X射线鬼成像”，J Synchrotron Rad 31(6), 1525–1533（2024年）[doi:10.1107/S1600577524008038]。45. O. Sefi 等，“利用高能X射线进行20 μm分辨率的多像素鬼成像”，Opt. Express 32(21), 37001（2024年）[doi:10.1364/OE.524414]。46. N. Zhao 等，“基于实验室X射线源的并行鬼成像推广”，《X射线科学与技术杂志》，08953996251367214（2025年）[doi:10.1177/08953996251367214]。

47. O. Sefi 等，“使用单像素探测器对快速动态进行X射线成像”，Opt. Express 28(17), 24568 (2020) [doi:10.1364/OE.396497]. 48. J.-T. Xie 等，“通过扫描聚合图案实现快速X射线鬼成像”，Photon. Res. 13(10), 2734 (2025) [doi:10.1364/PRJ.560065]. 49. O. Katz、Y. Bromberg 和 Y. Silberberg，“压缩鬼成像”，Applied Physics Letters 95(13), 131110 (2009) [doi:10.1063/1.3238296]. 50. E. J. Candes 和 J. K. Romberg，“从随机投影中恢复信号”，载于 SPIE Proceedings，C. A. Bouman 和 E. L. Miller 编，SPIE，圣何塞，加利福尼亚州 (2005)[doi:10.1117/12.600722]. 51. D. L. Donoho，“压缩感知”，IEEE Trans. Inform. Theory 52(4), 1289–1306，美国电气电子工程师学会 (IEEE) (2006)[doi:10.1109/tit.2006.871582]. 52. L. Pan 等，“啁啾幅度调制外差鬼成像的实验研究”，Opt. Express 28(14), 20808 (2020) [doi:10.1364/OE.399006]. 53. P. Zerom 等，“利用平均散斑图案进行热鬼成像”，Phys. Rev. A 86(6), 063817 (2012) [doi:10.1103/PhysRevA.86.063817]. 54. C. Li 等，“一种高效的增广拉格朗日方法及其在总变差中的应用

最小化”，《计算优化与应用》56(3)，507–530（2013）[doi:10.1007/s10589-013-9576-1].

Hui Zeng 目前是博士生；他于2022年开始在上海交通大学激光等离子体重点实验室（教育部）从事 X 射线鬼成像领域的研究。Ming-Fei Li 于2014年获得中国科学院物理研究所博士学位，目前是该所应用物理中心的教授。他的研究聚焦于全波段鬼成像/单像素成像。Yi-Fei Li 于2017年获得中国科学院物理研究所博士学位。他的研究兴趣包括新型激光驱动 X/γ 辐射源及其应用，以及激光驱动电子加速。

施建宏于2003年获得上海交通大学物理系光学博士学位，目前在该系担任副教授。他的研究重点是量子关联成像和单光子成像技术。

陈利明现任上海交通大学教授，此前曾任中国科学院物理研究所教授。他于1990年毕业于复旦大学，并于2000年在中国科学院物理研究所获得等离子体物理博士学位。目前，他的研究方向主要包括激光驱动电子加速、超短X射线产生及其应用。

吴令安于1987年获得德克萨斯大学奥斯汀分校博士学位，现为中国科学院物理研究所荣休教授。目前，她的研究方向主要是X射线波段的鬼成像。

其他作者的简介和照片尚未提供。