
帧间连续性实现无透镜动态成像突破

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/36546.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

帧间连续性实现无透镜动态成像突破。 导读

近日，南方科技大学张福才副教授研究团队针对传统相干衍射成像性能不稳定的问题，创新性地提出利用动态样品在时间维度上连续变化的特性作为相位恢复算法的空间约束，即帧间样品连续性约束，并基于此开发出了串行相干衍射成像算法（SerialCDI）。

相关成果在国际顶尖光学期刊《Light：Science Applications》发表，题为Serial coherent diffraction imaging of dynamic samples based on inter-frame continuity。

研究背景

近25年来，相干衍射成像技术（Coherent Diffraction Imaging, CDI）取得了显著进展。作为一种计算成像技术，CDI通过迭代相位恢复算法，从样品的衍射光强度散斑图样中重构其吸收和相位分布。该方法不依赖高质量成像透镜，其理论分辨率可达光学衍射极限，在材料科学和生物学领域展现出巨大的应用潜力。

其中，叠层扫描相干衍射成像（Ptychography）通过引入照明重叠区域的样品一致性约束，克服了传统CDI常见的收敛停滞或发散问题，显著提升了对一般扩展样品的算法收敛性和成像质量。目前，该技术已经成为全球各X光同步辐射装置成像实验站的主流技术，并在分辨率上展现出远超像差校正电镜的潜力。

与此同时，随着X射线自由电子激光器（XFEL）以及飞秒、阿秒短脉冲光源的迅速发展，动态成像技术的需求日益凸显。而叠层扫描相干衍射成像因其固有的扫描机制，在动态样品成像应用中存在明显局限。研究团队此前提出的相干调制成像技术（Coherent Modulation Imaging, CMI）虽然可用于动态成像，但该方法的关键器件-调制器-仍面临辐照损伤和标定等关键技术挑战。目前，针对动态样品的衍射成像方法仍缺乏成熟、通用的解决方案。

研究内容

为了解决上述问题，研究团队创新性地提出利用动态样品在时间维度上连续变化的特性作为相位恢复算法的空间约束，即帧间样品连续性约束，并基于此开发出串行相干衍射成像算法（SerialCDI）。在SerialCDI图像重建过程中，首先沿时间轴计算各重构样品像素点的标准差，并将其自适应地转换为相似性分布图（图1e）：变化剧烈的点取值趋近于0，变化平缓的点取值趋近于1。随后，算法利用相似性分布对不同帧重构结果进行加权平均，生成新的样品估计。这一约束条件的引入不仅有效加快了重建收敛速度，同时显著提升了重建图像的质量（见图1c）。

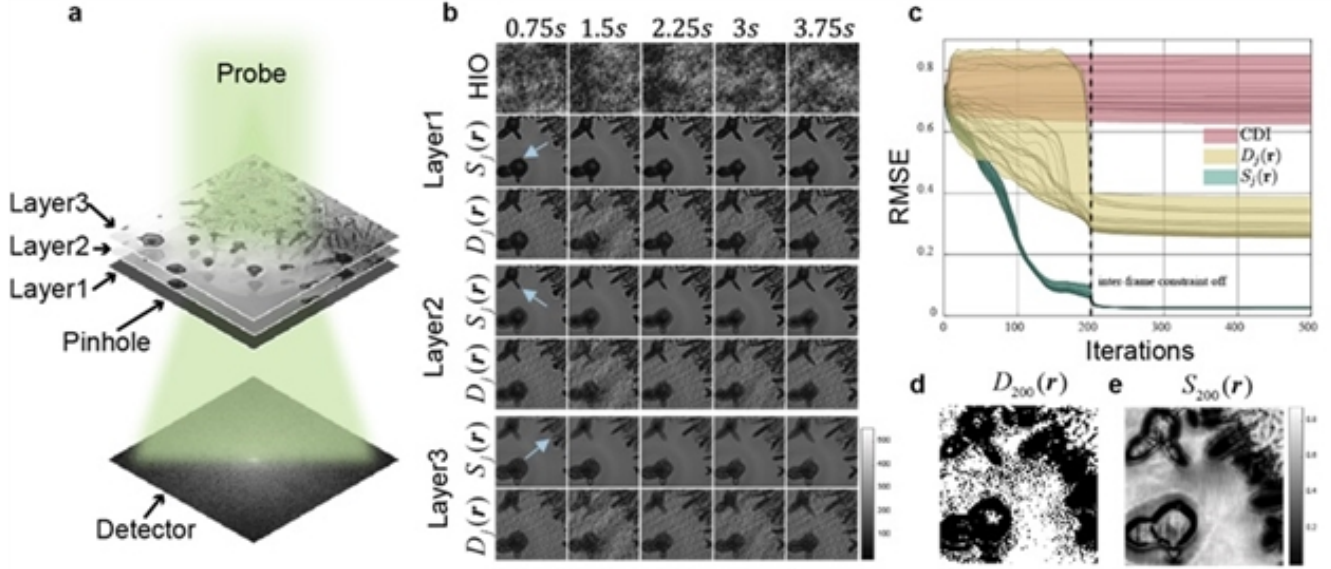


图1. (a) 光路示意图。 (b) 仿真重构结果。 (c) 迭代过程误差变化曲线。绿色为新方法的收敛曲线。 (d) 用现有文献中的二值分区法得到的掩膜图；白色和黑色分别对应不变和变的区域。 (e) 新方法计算得到的相似度分布。

研究团队用活体眼虫样品进行了验证实验。通过额外采集无样品衍射图，SerialCDI能够有效分离照明光，重构出纯样品的复振幅分布（图2a）。此外，研究团队通过数值重聚焦，获取了样品在不同深度截面的清晰图像（图2b）。针对X光实验中可能出现的中心斑缺失问题，研究团队进一步进行了鲁棒性测试：在人为剔除衍射图中心 910 个像素（约 25 个散斑）的情况下，重构结果的质量仍接近完整数据的水平，充分验证了该方法对数据缺失具有较强的鲁棒性。

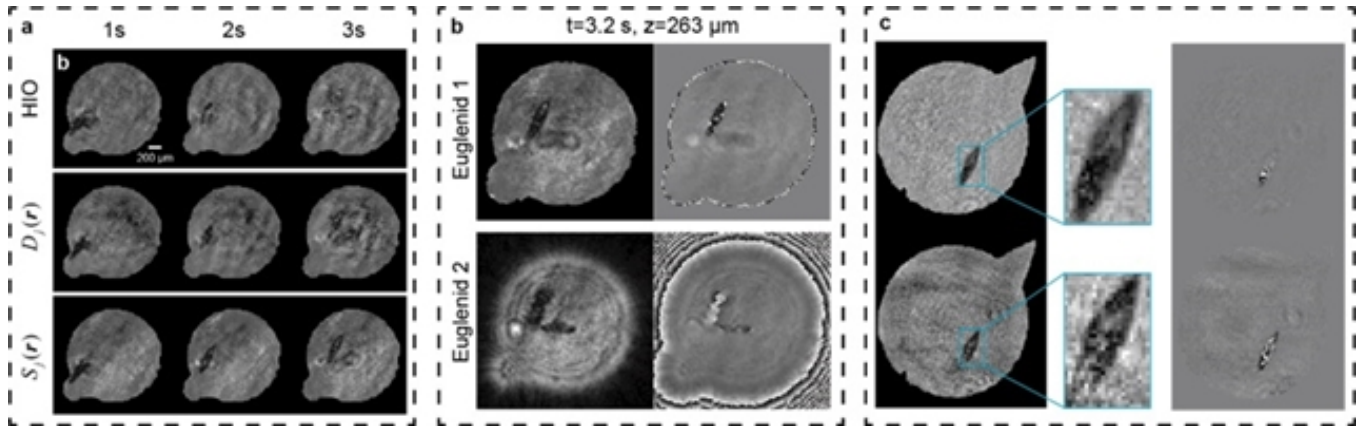


图2. (a) 不同时刻重构的眼虫吸收图。 (b) 聚焦到不同深度时的吸收和相位图。 (c) 衍射图中心区域缺失情况下重构和完整结果对比。

进一步的实验证明，即使在样品前后帧间连续性较弱的情况下，通过引入结构光照明在样品平面提供额外的结构信息，SerialCDI仍能实现高质量成像（图3）。研究团队特别模拟了XFEL脉冲位置不稳定的情况，结果显示：SerialCDI能够获得清晰的图像，而Ptychography即便在已知扫描位置的情况下重构结果也出现模糊现象。这一对比实验凸显出新方法在脉冲光源应用中的优势。

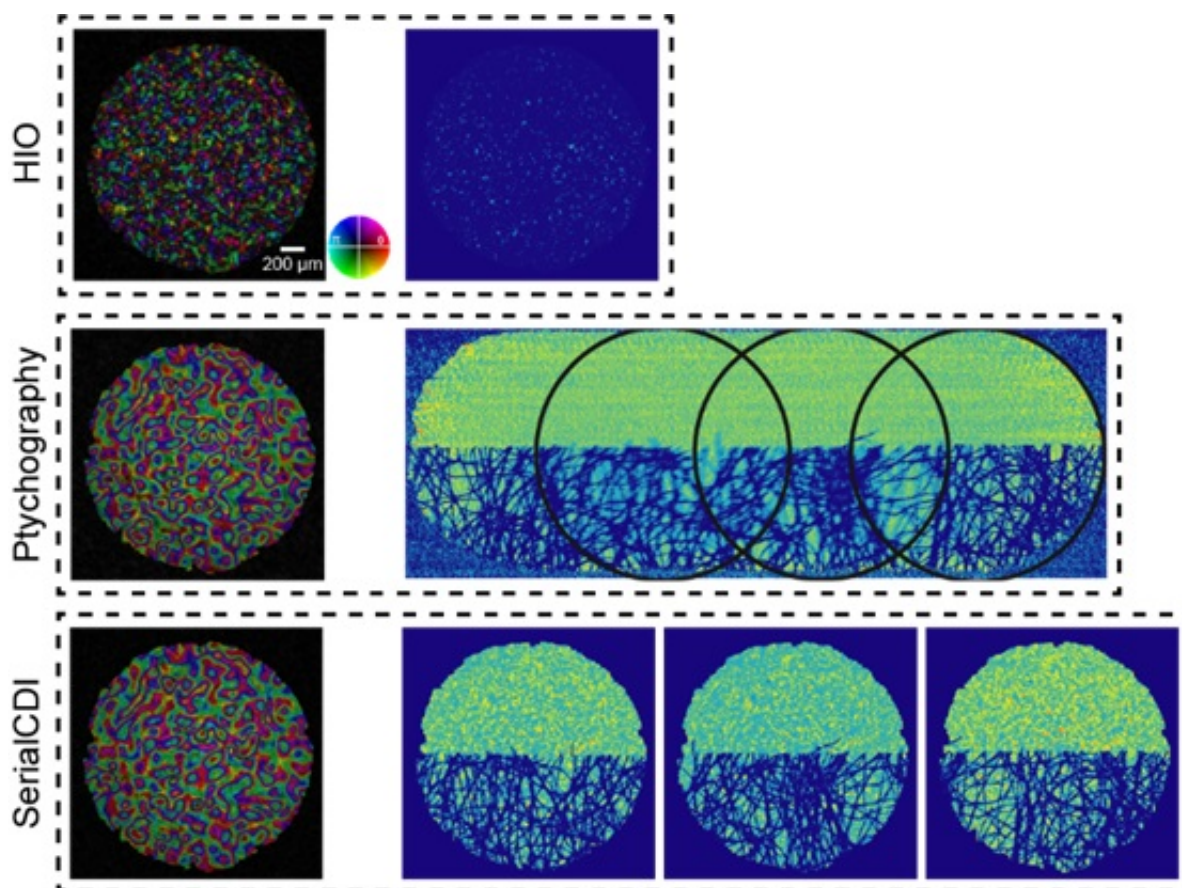


图3. 照明光存在不稳定性情况下SerialCDI和Ptychography重构对比。

总结与展望

针对传统相干衍射成像性能不稳定的问题，本研究创新性地提出了样品帧间连续性约束，并通过实验成功验证了其有效性和优势。SerialCDI数据集蕴含大量的冗余信息，这为放宽实验条件限制、进一步提升成像性能提供了多种可能性。未来，通过结合多波长相位恢复算法和宽谱光源，SerialCDI有望实现动态光谱分辨成像，为观察微观动态过程提供创新工具，从而推动材料科学和生物科学等领域的前沿研究。（来源：LightScienceApplications微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41377-025-01860-8>

作者：张福才等 来源：《光：科学与应用》

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](https://www.iikx.com)转发