Light 全光衍射解码器实现扩展景深超分辨图像投影

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：https://www.iikx.com/news/progress/42871.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！

Light 全光衍射解码器实现扩展景深超分辨图像投影。 导读

加州大学洛杉矶分校（UCLA）的研究人员开发了一种新型混合图像投影系统，可在扩展景深上提供超分辨率图像。通过将基于神经网络的数字编码器与无源全光衍射解码器相结合，该系统可大幅压缩图像数据以实现高效传输。该技术在解码阶段无需额外功耗，有望为下一代虚拟现实和增强现实显示技术带来重大突破。该研究成果以Super-resolution image projection over an extended depth of field using a diffractive decoder为题发表在国际顶尖学术期刊《Light: Science Applications》。

研究背景

增强现实与虚拟现实（AR/VR）系统在教育、医疗保健及娱乐等多个领域展现出变革性的潜力。这些系统致力于为用户提供身临其境的沉浸式体验，然而全息显示的商业化和普及正面临严峻的物理与信息处理瓶颈。核心挑战之一在于空间光调制器（SLM）的像素数量受限，即空间带宽积不足，这直接制约了显示系统的视场角和图像分辨率。此外，实时渲染并向本地设备传输高分辨率、全视差的全息图需要庞大的数据带宽。传统的图像压缩技术在压缩图像数据时，会不可避免地丢失对合成高质量全息图至关重要的高频细节。因此，业界亟需一种颠覆性的显示架构，以同时克服数据传输压力、终端算力限制，以及硬件空间带宽积的瓶颈。

创新研究

为了突破上述技术壁垒，加州大学洛杉矶分校（UCLA）的研究团队提出并实验验证了一种基于深度学习的数字-模拟混合图像投影新架构。该平台通过将前端的数字编码器与后端的无源全光衍射解码器无缝融合，在极大降低数据存储与传输成本的同时，成功实现了扩展景深与像素级超分辨率的双重提升。

该系统的工作机制极具创新性：首先，基于卷积神经网络的轻量级数字编码器在信号源端发挥作用，将高分辨率的输入图像进行高效特征压缩，转化为紧凑的低分辨率纯相位图案。在此过程中，图像的像素总量可实现高达数十倍压缩，从而大幅削减了数据传输负担。随后，这些压缩数据被传输至显示终端，由低规格的空间光调制器加载显示。此时，光波穿过系统的核心——由单层或多层微纳结构组成的无源全光衍射解码器。光波在这些精心设计的光学物理层中发生复杂的衍射与干涉，以光速完成前向无源解压计算，最终在三维空间中合成出超越原生设备物理极限的高保真、超分辨率、扩展景深图像。

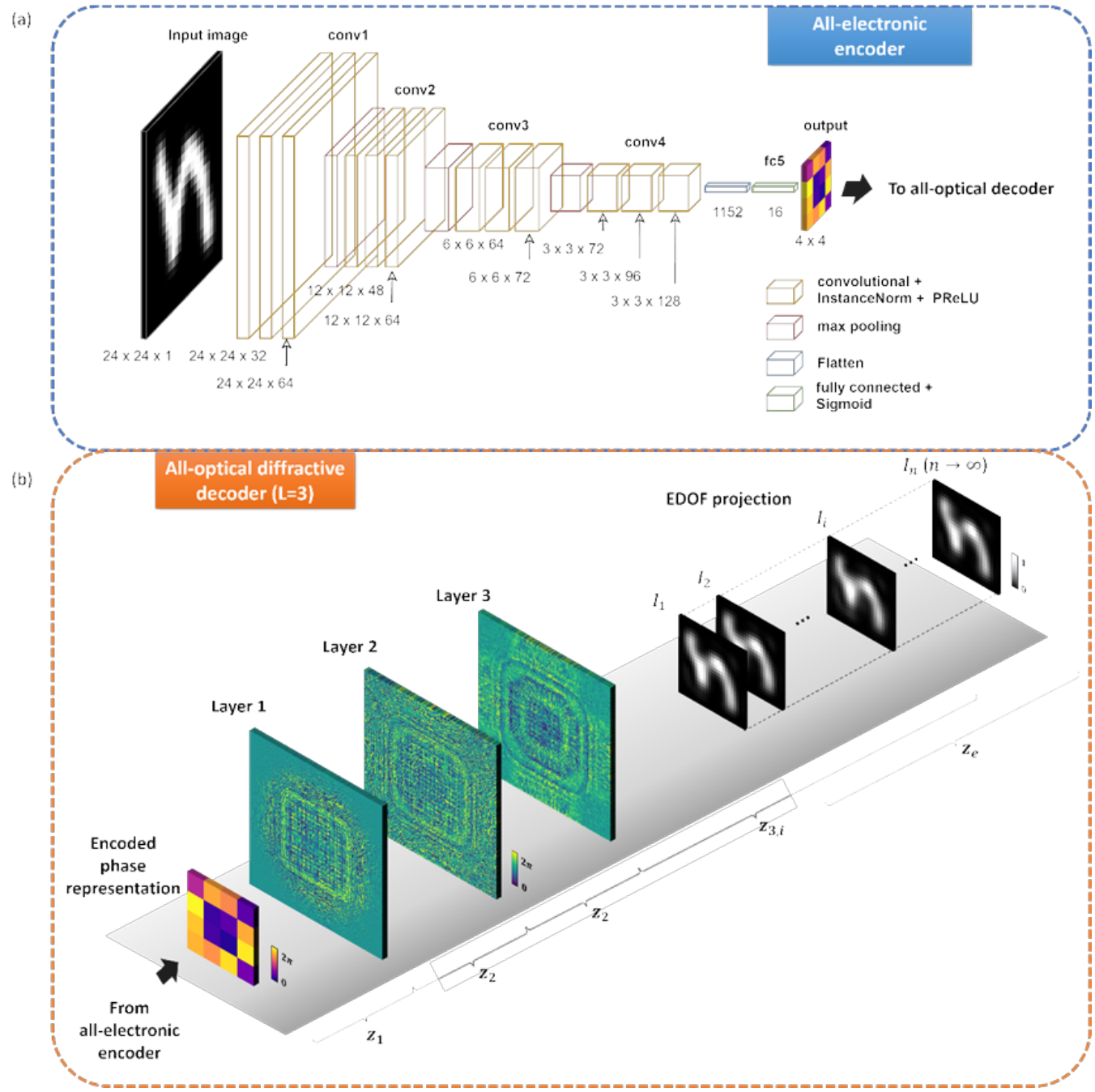


图1. 结合数字编码器与衍射光学解码器的混合超分辨率图像投影系统技术示意图。(a) 数字编码器将灰度输入图像转换为紧凑相位编码表征。(b) 衍射解码器以全光方式对波前进行解码和调制，从而实现具有扩展景深的连续投影。

我们的目标是利用光子学本身的物理优势来打破电子显示的算力与带宽天花板，研究团队指出，通过将繁重的超分辨率信息解码任务交由无需任何额外能耗的全光衍射层来完成，我们不仅突破了SLM的物理像素限制，更在无形中极大地减轻了显示终端的功耗与计算延迟负担。

为了验证该架构的跨波段通用性与可扩展性，研究团队不仅进行了广泛的数值模拟，还在太赫兹波段（波长为0.75毫米）与可见光波段（波长635纳米）分别搭建了物理实验系统进行概念验证。实验测量结果与数值模拟高度吻合，证明了不同配置下的系统均能可靠运行。此外，该系统展现

出卓越的外部泛化能力。尽管神经网络算法仅在特定的手写字母数据集上进行了内部训练，但在面对诸如高密度物理光栅或是随机涂鸦（Quickdraw dataset）等从未见过的测试目标时，系统依然能准确无误地完成高保真超分辨率投影，证明其学习到了普适的物理光场映射规律和超分辨率算法。

未来展望

这种数字编码与被动光波解码相结合的混合型图像投影系统拥有极其广阔的升级空间。得益于全光解码器的物理穿透特性，研究人员可通过增加衍射层的数量或调整微纳特征的密度，在光学衍射极限内进一步按比例提升系统的输出分辨率。更重要的是，该框架天然契合大规模并行处理的理念。未来的显示引擎可以集成成百上千个并行运行的衍射计算单元，每个单元负责特定的空间子孔径或深度分段，从而将整个显示系统的空间带宽积推向全新的高度。

随着现代纳米晶圆级光刻工艺和多层对齐制造技术的日益成熟，制造大孔径、高集成度的多层可见光衍射解码器已具备产业化基础。这项底层光学创新，不仅为解决下一代全息显示中的能效冲突与数据瓶颈提供了一条切实可行的技术路径，其核心原理还可广泛延伸至三维光学计量学、高分辨率光学显微镜以及高级科学仪器等多个前沿领域，有望在全球范围内引领新一轮的光子计算与显示技术革命。（来源：LightScienceApplications微信公众号）

相关论文信息：https://doi.org/10.1038/s41377-026-02320-7

特别声明：本文转载仅仅是出于传播信息的需要，并不意味着代表本网站观点或证实其内容的真实性；如其他媒体、网站或个人从本网站转载使用，须保留本网站注明的“ 来源 ”，并自负版权等法律责任；作者如果不希望被转载或者联系转载稿费等事宜，请与我们接洽。
作者：Aydogan Ozcan 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转发