全息并行加工赋能可见光视觉处理器

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：https://www.iikx.com/news/progress/41443.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！

全息并行加工赋能可见光视觉处理器。 导读

近期，香港中文大学黄超然教授团队与陈世祈教授团队在Light: Advanced Manufacturing上发表了题为Multi-task, large-scale integrated optical vision processor using ultrafast parallel nanofabrication的研究论文。该论文由欧阳文琪博士与吕文博士等作者共同协作完成。

本研究创新性地提出了一种基于随机投影设计的高性能光学神经网络（ONN）器件架构。面向可见光应用场景，团队立足于百万级像元的规模化制造需求，设计了500纳米的高密度像素结构，并实现了透射式随机衍射相位分布。为解决高精度、快速批量制备的难题，研究团队自主研发了全新的双光子飞秒微纳加工工艺。通过引入优化的多焦点三维并行随机扫描策略，该工艺有效攻克了超高通量加工中精度与效率无法兼顾的瓶颈，仅需15分钟，即可在1平方毫米内完成400万个光学神经元的集成制备，打破了传统微纳制造的成本与精度双重限制。最终研制的光学神经网络芯片可直接嵌入微型相机中。通过与轻量化、小型化电神经网络协同工作，该芯片能够稳定执行图像分类、动作识别及目标关键点检测等多项复杂智能视觉任务，综合识别准确率高达97%-99%。该器件展现出极佳的实际应用适配能力，为低成本、高效率的光电融合协同计算开辟了全新路径，有望在空间感知、生物检测、人机交互等领域迎来广泛应用。

在后摩尔时代，人工智能与神经网络算法的蓬勃发展催生了对超高通量计算的需求，也加速了计算架构由电向光的转变。得益于天然的光速并行与低功耗优势，光学神经网络（ONN）作为一种以光子为信息载体、模拟大脑神经元连接的新型计算架构，正成为突破传统算力瓶颈的关键。为了实现高性能、多任务的视觉感知计算，研究团队设计了基于随机投影（Random Projection）的光学衍射层作为该ONN器件的核心。在可见光波段的应用场景下，为了确保视觉处理器的计算性能，器件的像素尺寸必须压缩至亚波长级别（即500纳米的高密度随机相位结构）。这些微小的随机相位单元在空间中犹如无数个光学随机权重，当器件接入透镜与相机进行傅里叶域信息采集时，能够对输入的光学信息进行高效的降维与特征提取，可与轻量化的电神经网络结合实现高准确率的图像识别。这种高密度三维像元设计对微纳制造工艺提出了严苛要求，在亚波长尺度下精准实现密集的相位分布，是保证光学计算器件准确性的核心前提。

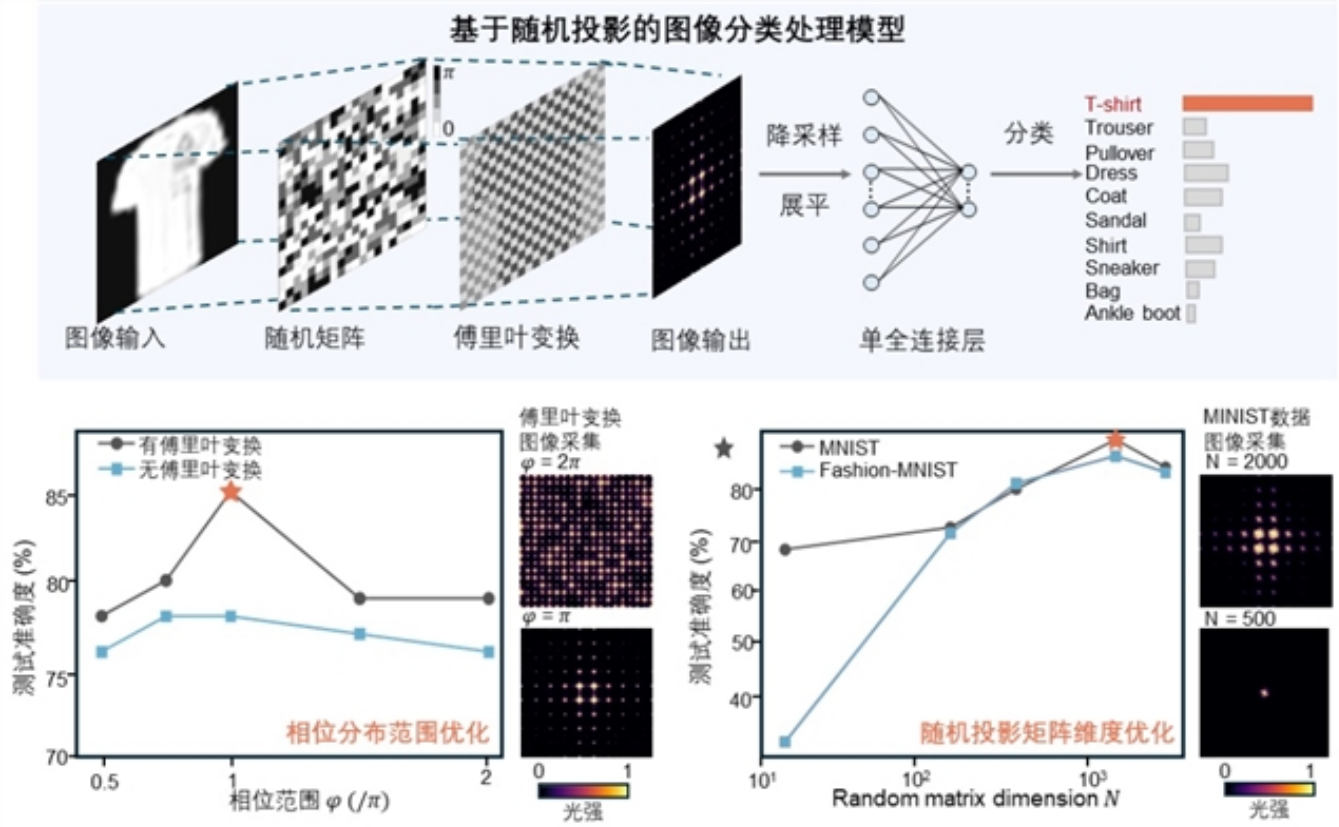


图1：随机投影ONN光学处理器架构与优化设计

在微纳制造领域，如何兼顾高精度与高通量始终是核心命题。研究团队巧妙利用了数字微镜器件（DMD）这一常用于投影仪中的核心芯片，在实验室中将其转化为全息光场的指挥官。通过自主开发的算法，DMD能够以与飞秒脉冲同频的超高刷新率，控制数十万面微镜的偏转，实现对单脉冲激光波前的任意调制。这一技术积淀使系统的制造能力实现了量级提升，从早期的单焦点扫描，演进到能够同时操纵两千个焦点并行工作。同时，DMD的高度灵活性赋予了系统随机寻址（Random-access）的能力，使焦点得以跳出传统的顺序扫描范式，在三维空间内实现指哪打哪的高通量加工。

然而，当研究团队试图将这一制造优势应用于构建亚波长像素阵列时，遇到了全新的挑战。在使用双光子聚合（TPL）这一超高精度纳米打印技术进行初步尝试时，团队发现：虽然系统本身具备亚百纳米的超高加工分辨率，但在面对500纳米高密度像素阵列时，传统的顺序扫描会引发光敏材料内部的化学扩散和反应物积累，导致相邻的纳米柱发生物理融合，原本分立的像素结构糊成了一片。这如同在吸水性极强的纸上连续落笔，相邻的墨迹会在瞬间晕染、融合。这种由材料交联引发的邻近效应干扰，成为了制备可见光波段大规模集成光子器件的关键瓶颈。

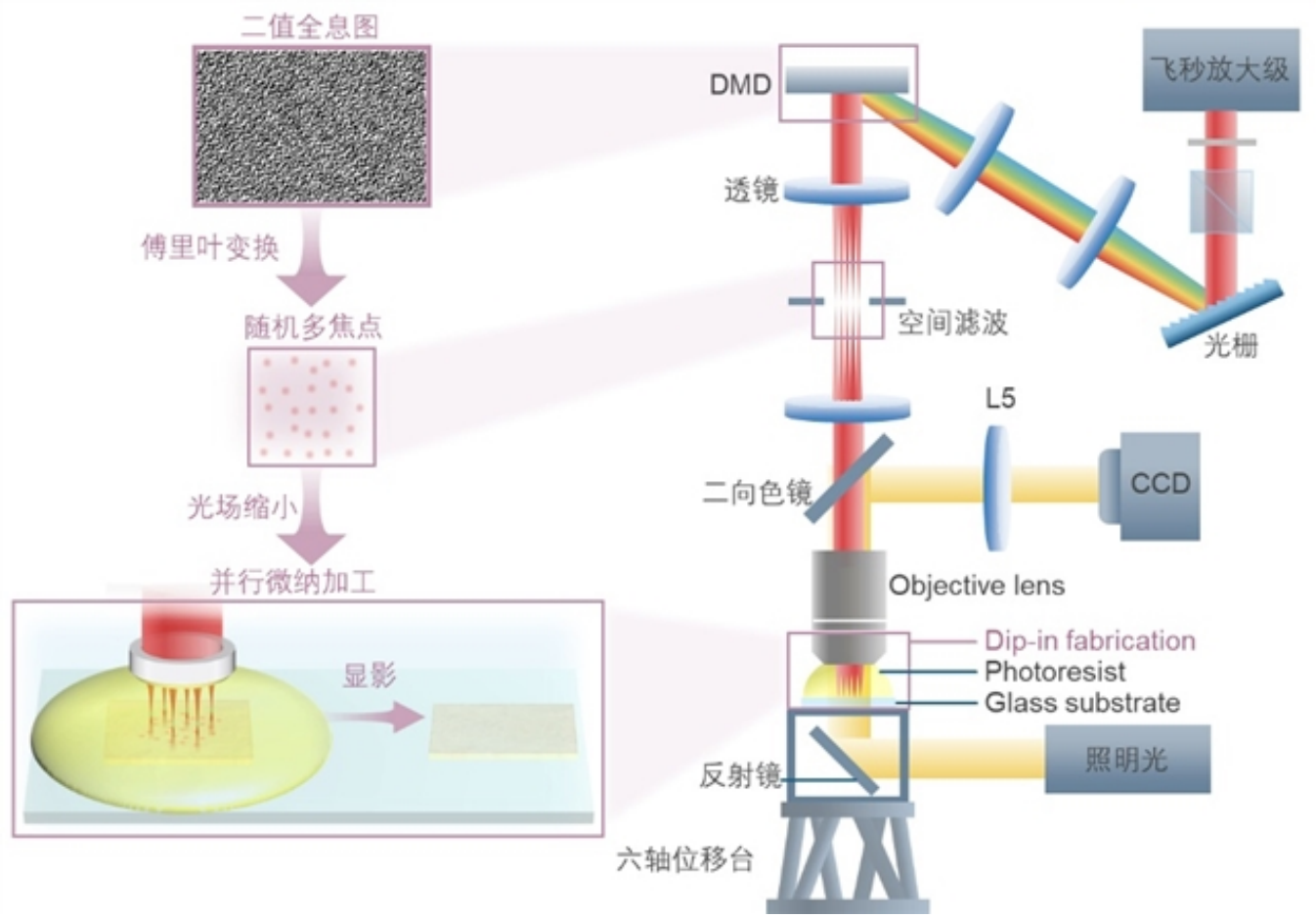


图2：基于DMD全息光场调控的多焦点并行加工系统示意图

针对这一瓶颈，研究团队提出了一种反常规的思维方案：多焦点随机扫描策略。既然按顺序打印会产生干扰，何不让焦点跳着走？该方案通过精密的时空编排，将原本在物理空间上相邻的像素，在加工时间序列上彻底拉开。依靠DMD的极速响应与三维多焦点算法的精确控制，系统在三维空间内进行多焦点的随机位点曝光，同时其z轴焦点位置直接精准定义了每个微纳像元的高度。这种以空间换时间的策略，为每个像素留出了充裕的扩散与固化窗口。实验证明，多焦点并行随机扫描技术与ONN随机投影设计达到了完美的契合，在保留高通量制造速度的同时，彻底解决了高密度像素融合的难题，使不同高度的500纳米尺寸分立像元清晰可见。

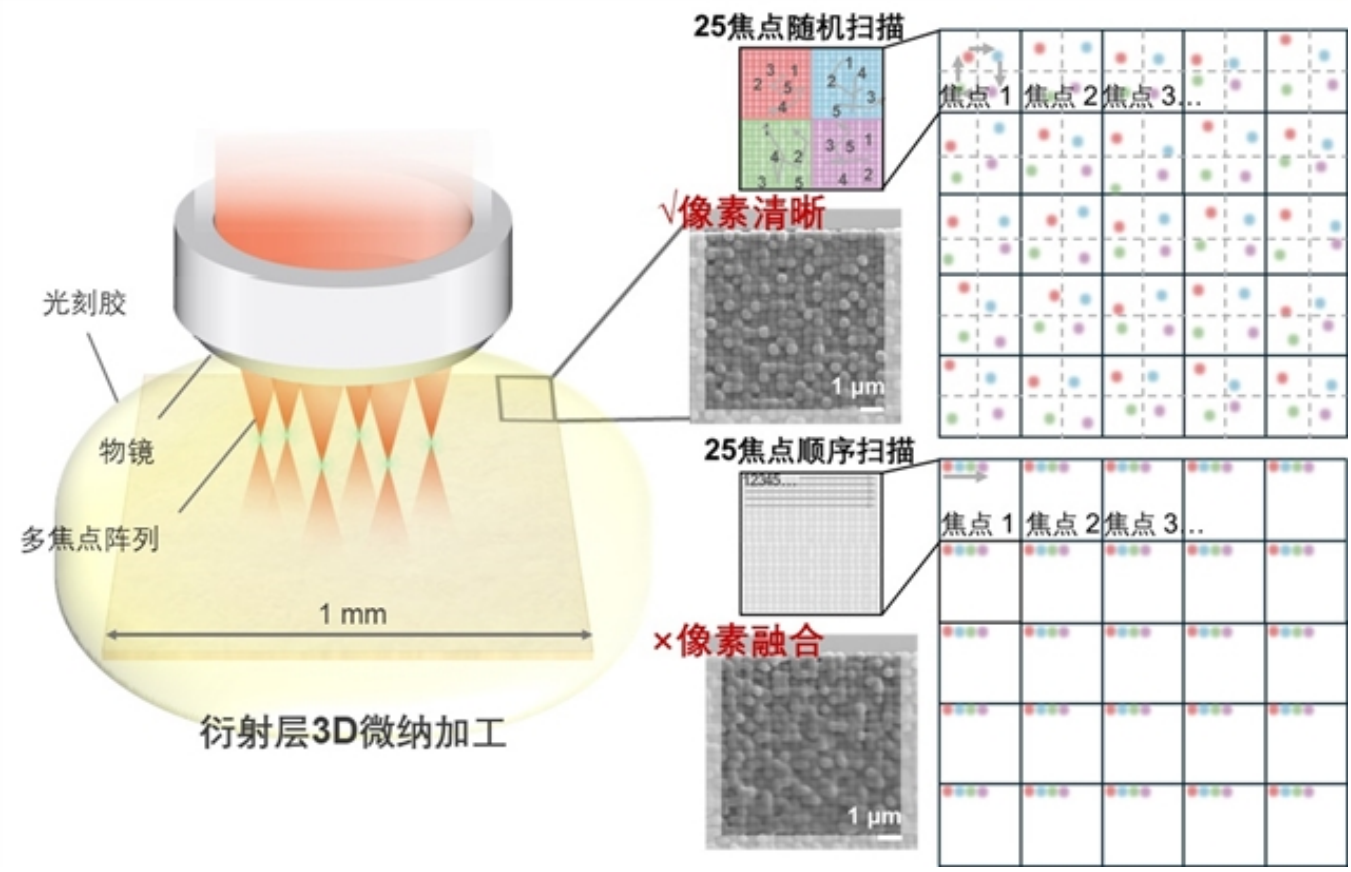


图3：顺序扫描与随机扫描模式下的物理演化对比

飞秒微纳加工制造工艺的突破直接带动了ONN器件性能的跨越。利用该平台，研究团队仅需15分钟，便在1平方毫米区域内集成了四百万个光学神经元。与传统需要复杂训练的光学神经网络不同，该器件基于随机投影原理，无需对神经元进行耗时的离线训练或特定设计。在实际应用中，该芯片只需与透镜、相机传感器简单组装，即可构成一个高效的光电混合计算系统。这种随机投影设计与高通量微纳制造工艺的结合赋予了系统三大核心优势：

多任务兼容性：同一个ONN器件可以胜任多种图像识别任务，无需更换硬件；该器件表现出了极高的图像处理准确率，不仅能实现图像分类（如手写数字、时装、细胞等数据集），还能完成人脸关键点检测等复杂任务。

集成鲁棒性：随机投影架构对光学系统的对准误差具有极高的容忍度，不需要像素级别的精确对准，大幅降低了系统组装与维护的难度，更利于实际工业场景的部署应用。

普惠制造：该方案具备低成本、高扩展性的特点，且能适配PDMS软翻模等微纳复制工艺。这意味着不仅能在实验室中高效打印光子芯片器件原型，更具备工业化量产的巨大潜力。

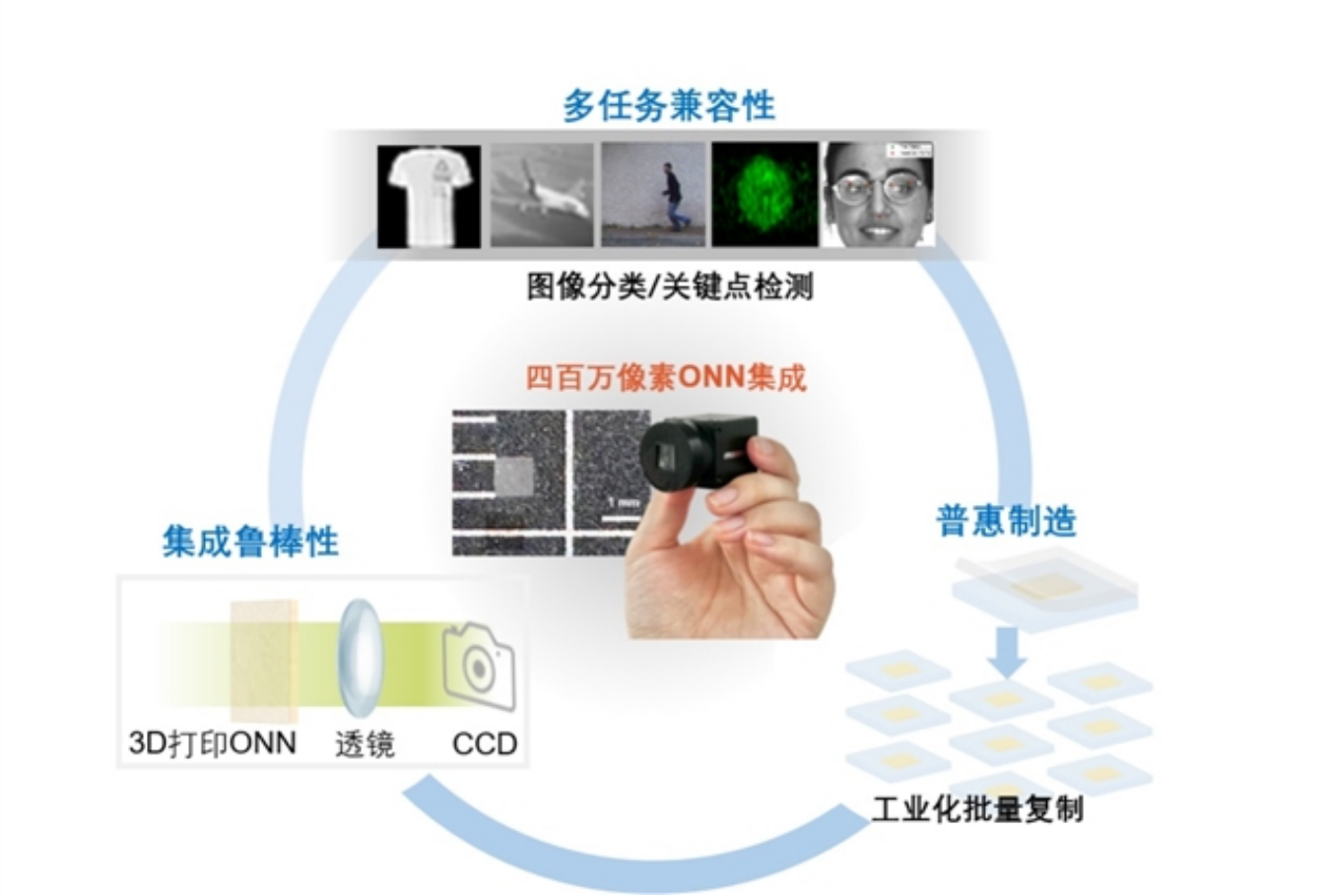


图4：视觉处理器的优势表现

总结与展望

展望未来，研究团队对该技术在快速动态感知、大规模通量扩展以及多元场景应用中的潜力寄予厚望。通过工艺迭代与设计优化，该技术不仅能为下一代高通量激光雷达（LiDAR）强力赋能，还可配合高速光电探测器实现对微秒级超快时序动态的精准捕捉；同时，团队也将探索通过材料革新，将该架构迁移至更贴近日常生活的非相干光应用场景，并推动其与成熟硅基光子芯片的协同工作。这种多维度的融合与跨越，有望从根本上打破现有算力瓶颈，为普及光电融合协同计算开辟全新路径。（来源：先进制造微信公众号）

相关论文信息：https://doi.org/10.37188/lam.2026.096

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：黄超然等 来源：《光：先进制造》

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