
超透镜定量相位成像

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/31987.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！

超透镜定量相位成像。 导读

近日，来自华盛顿大学的Arka Majumdar团队利用双曲面超透镜的轴向色差进行定量相位成像。其单透镜定量相位成像方法通过从明场彩色图像中提取完整的电场信息，克服了典型相位成像方法的对准问题。该技术展示了基于商业发光二极管和相机的强大实时相位检索能力与基于超透镜光学内窥镜光谱信息的结构特征解析能力。该成果以Quantitative phase imaging endoscopy with a metalens.为题发表在国际顶尖光学期刊《Light: Science Applications》。华盛顿大学的Aamod Shanker为论文第一作者，Arka Majumdar为论文通讯作者。

研究背景

纳米制造技术、电磁仿真技术和计算成像技术的蓬勃发展极大推动了成像系统小型化的发展。内窥镜、血管镜等生物学成像系统不仅需要成像元件小型化，而且需要捕获更多维的图像信息，尤其是相位信息。能够保留大梯度相位信息的亚波长平面衍射光学技术无疑是实现上述目标的突破方向之一。

定量相位成像显微镜能够从光强中提取关于光程长度的精确定量信息。具体方式是通过反向传播光路进行3D成像和重建，从而提取强度与相位信息。传统的干涉相位成像技术的参考光束和散射光束之间的测量需要精细对准，由于在扫描方法中引入了额外的机械复杂性，且严格的相干性要求需要引入可调谐的激光系统，因此传统的相位成像方法在小尺度的临床应用方面难度极大。而离焦定量相位成像技术是一种非干涉的部分相干相位成像方法，自参考特性和部分相干的高容错性使其被广泛应用于原子和分子结构成像、x射线相位成像和眼镜检查的无创诊断等。然而，在单透镜的内窥镜成像系统中进行实时定量相位成像仍未实现。

基于以上问题，华盛顿大学的Arka Majumdar团队利用双曲面超透镜的轴向色差进行定量相位成像。他们的单透镜定量相位成像方法通过从明场彩色图像中提取完整的电场信息，克服了典型相位成像方法的对准问题。

创新研究

该团队基于超透镜的轴向色差，通过对光谱的深度编码实现体积成像。这是一种非干涉测量的成像技术，相位通过多次的离焦测量计算获得。在一次测量中，多个焦平面被编码在RGB颜色通道中，其中红色、绿色和蓝色通道分别以455nm、530nm和625nm为中心。该方法的设计思路主要来自于光的共轭原理，该原理假设光路是可逆的，即聚焦与反向成像是等效的。

超透镜设计

该研究基于强度传输方程，将强度变化重构为恒定离焦距离下光波长的函数，描述了衍射光在一定传播距离下散射到具有一定相移和吸收的物体后的色散，自由空间的传播可以等效于光谱的移动。超透镜被专门设计为沿着纵向传播方向的光谱衍射光栅，而超透镜的焦距与波长具有精确的线性关系，其焦距与波长具有光谱依赖性，因此利用光谱-焦等效性可以将多个焦平面同时编码到光谱通道中。超透镜由中心波长分别为红色(625nm)、绿色(530nm)和蓝色(455nm)的LED光源发出的准直光照射，三种颜色通道的超构透镜的聚焦如图1所示，红蓝通道之间焦距的变化约为20%。在此基础上，将光谱通道校准为等效离焦测量值，即可通过求解线性传输方程来实现定量相位成像。

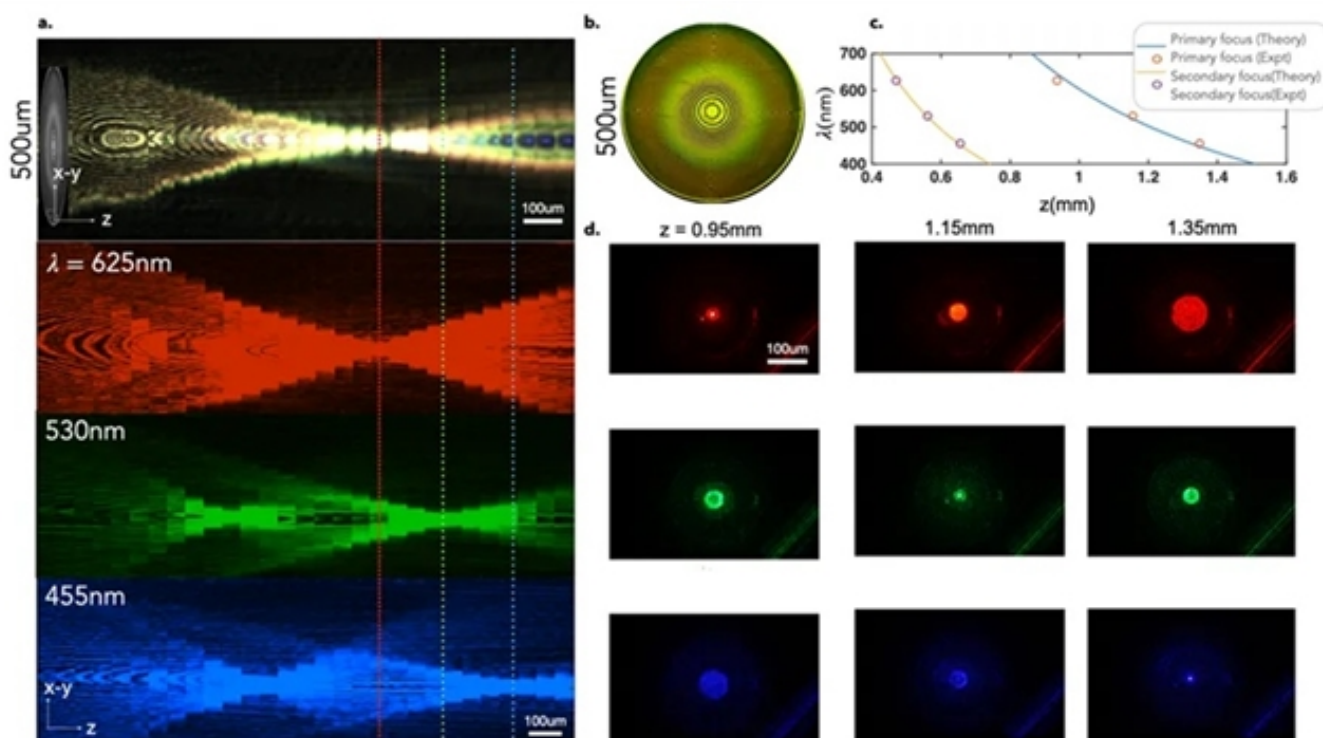


图1. 超透镜光谱表征。

光谱与焦距校准

超透镜显微镜设置如图2(a)所示，显微镜物镜将超透镜形成的图像传递给标准RGB彩色相机。正散焦和负散焦导致了强烈的焦线网络，称为焦散，类似于波状水池底部的明亮焦线，如图2(b, c)所示。通过对扩散器离焦测量值的校准，发现红通道和绿通道同时对应于两个离焦平面，距离为180μm，离焦等效情况如图2(d)。因此，利用两个颜色通道作为透焦测量即可计算定量相位，从而计算整个电场或光场。数字全息重建是通过与散焦点扩散函数的卷积来执行的。由于两个颜色通道或离焦图像足以计算相位，因此仅依靠红色和绿色通道来使用超透镜即可实现大多数的相位检索。

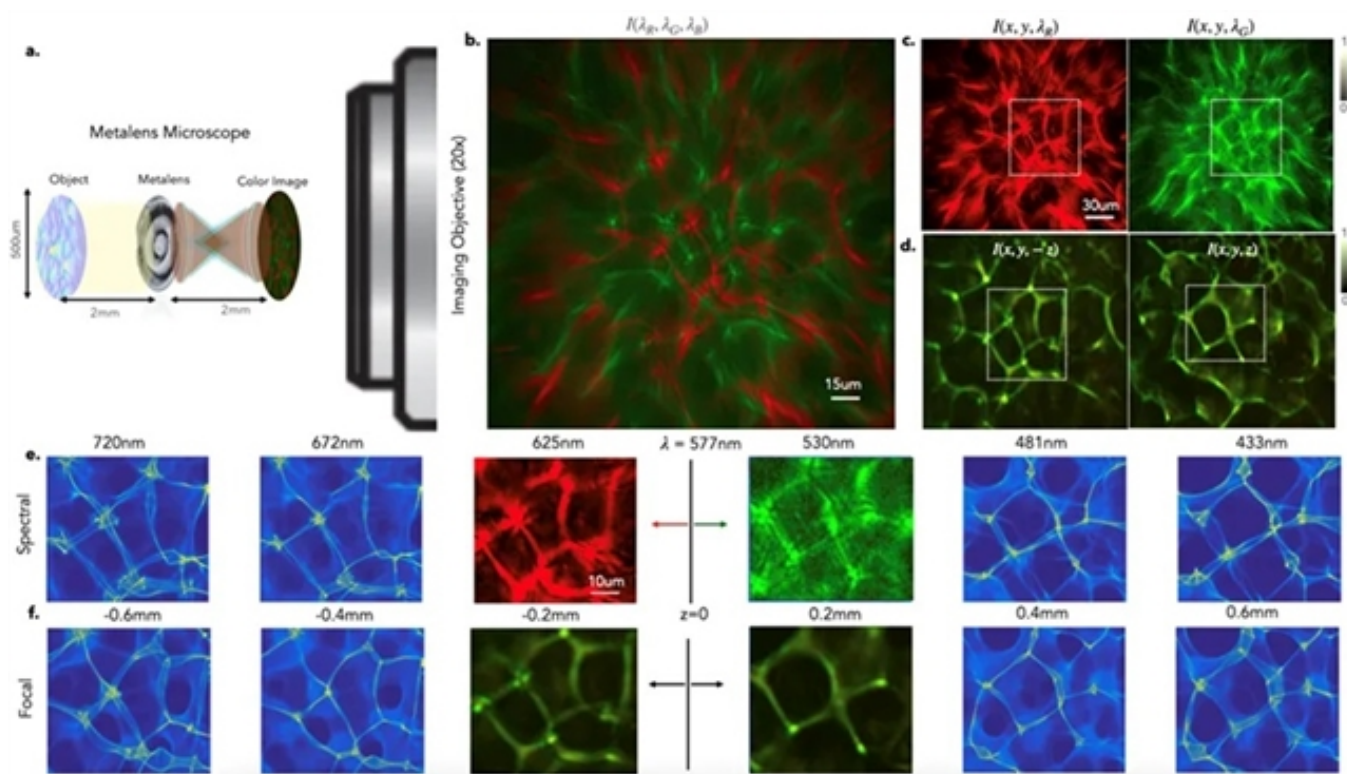


图2. 使用相机检测的实验演示。

定量相位内窥镜

该研究将超透镜显微镜装置转换为相干光纤束内窥镜，该光纤束由18000根单模光纤组成，每根光纤直径为3μm，分布在1mm²的区域内，其中的每一根光纤传输光电二极管仅仅保留每种颜色的入射光强度信息。只要频谱信道能够通过光纤束可靠地传输，便可以基于强度传输方程的相位恢复技术实现相干光纤束的相位恢复。如图3所示，本研究对螺旋藻进行成像，从单个白光图像中提取结构和拓扑信息。图3显示了恢复的螺旋体的相位和高度图，以及螺旋叶绿体在不同平面上的链和拓扑结构等特征。加入内窥镜后，虽然牺牲部分分辨率，但仍然能够识别出椭圆核，在交叉处也能够成功区分顶部和底部链。

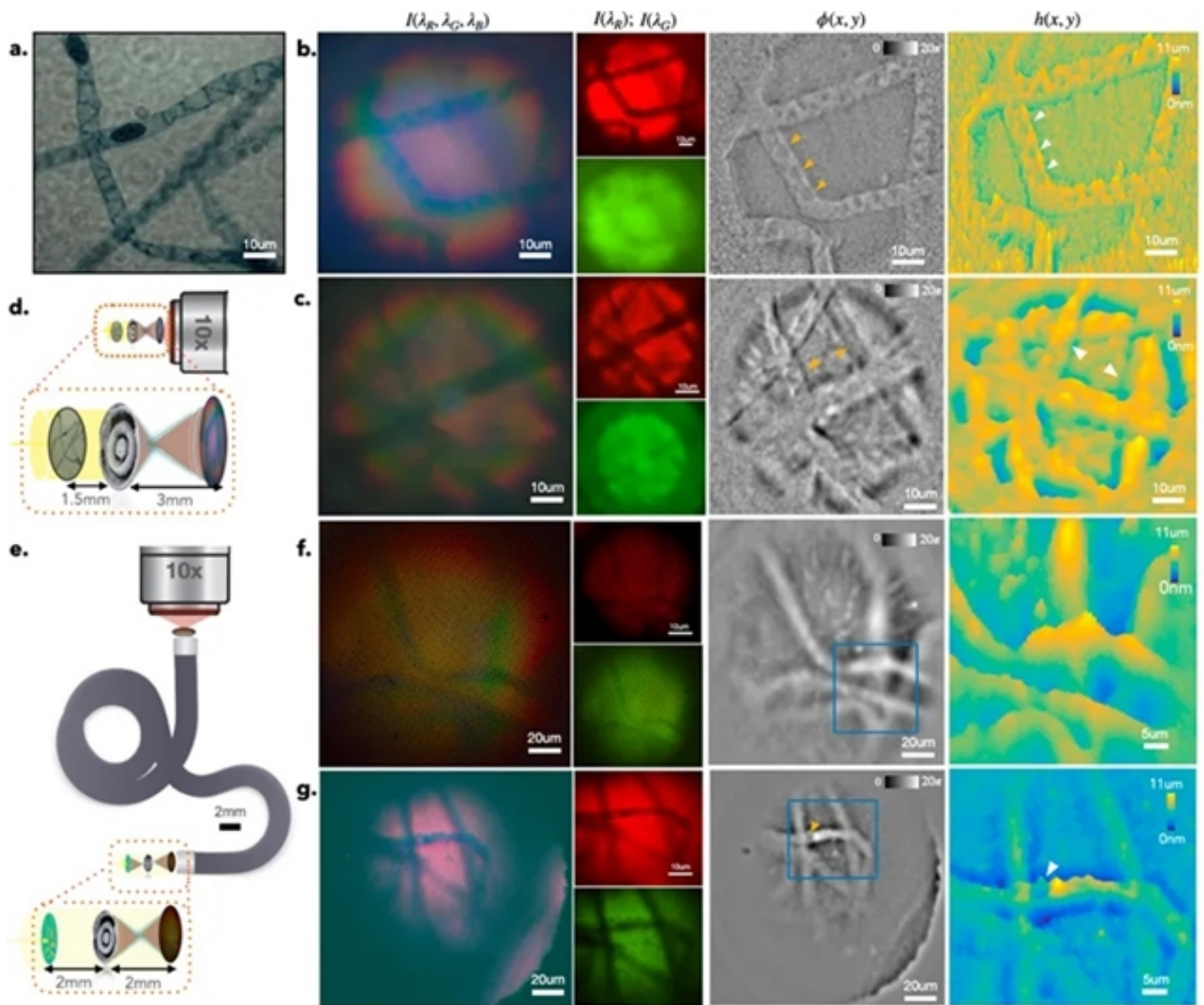


图3. 相干光纤束定量相位成像验证。

总结与展望

本研究利用双曲面超透镜固有的色散特性，将三个离焦平面编码为彩色相机测量的RGB颜色通道，通过聚焦强度实现对相位的计算恢复。此方法相位灵敏度高且仅需使用单透镜，在商业全息内窥镜方面有巨大的应用潜力，甚至在低相干或高色散的情况下也能重建整个3D光场。但虽然用于相位成像的单透镜系统在对准和复杂性方面很简单，但图像由于非远心效应会引入球差，必须进行计算补偿。（来源：LightScienceApplications微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41377-024-01587-y>

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事宜，请与我们联系。

作者：Arka Majumdar 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