

中继投影显微望远术 (rPMT)

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/33458.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！

导读

显微成像仪器是生物学等众多领域的重要设备，尤其具有长工作距离、大景深的高分辨光学显微镜在外科手术和活体生物研究中发挥着关键作用。近日，国防科技大学和解放军总医院联合的计算成像研究团队在这一领域取得了突破性进展，成功研发了一种新型光学显微成像方法，该方法采用简便易得的设备（见图1），把微米级显微成像的工作距离和景深范围提升了一个数量级以上，并且即便使用小口径镜头也能对近百米外的微小物体清晰成像。该成果发表在国际顶尖光学期刊《Light: Science Applications》，题为Relay-projection microscopic telescoping，国防科技大学衣文军为论文第一作者兼通讯作者，硕士毕业生朱书阅为共同第一作者，李修建研究员和解放军总医院耳鼻咽喉头颈外科学部刘穹副主任医师为论文共同通讯作者。

研究背景

当前光学成像技术条件下，同时提升光学成像系统的空间分辨率、成像距离与景深是一个公认的技术瓶颈，已有方案只能在这三个参数之间寻求折中，远远无法满足生物医学研究、半导体制造以及远程诊断等领域的迫切需求。根据光学成像理论，一个光学成像系统的空间分辨率由成像系统的数值孔径决定，更高的空间分辨率依赖于更大的数值孔径。但是，大数值孔径的镜头加工难度大、成本高、成像景深小，不利于实际应用。

近年来，已经发展出了一些计算成像技术来提高光学成像的空间分辨率，包括合成孔径、叠层扫描、光场调制等，但是这类技术通常需要高精度空间平移、精确相位调控、精准时间同步、大规模序列数据采集等，造成系统复杂度高、装调难、成像条件要求苛刻，依然无法解决上述瓶颈问题，无法进行长工作距离、大景深的高分辨实时显微成像。

因此，开发一种能够同时具备长工作距离、大景深和高空间分辨能力的成像技术，仍然是光学成像领域的一个重要挑战。

创新研究

该研究团队首次提出了一种名为中继投影显微望远术（rPMT）的新型光学显微成像方法，通过独特的平方律中继投影机制和非视域光收集策略，颠覆了传统光学成像方式，完美融合了显微与望远功能，同时满足远距离、高分辨、大景深需求，并展示了对活体生物样品的高动态视频成像能力。

如图1所示，rPMT成像方法仅使用简单设备，包括激光二极管、便携式相机和漫反射白板（如石灰墙面、投影幕布、普通打印纸），即可在厘米到数百米范围内实现微米级分辨率成像。实验验证表明，rPMT采用非视域光信号采集方式获得单帧大范围功率谱图像，并利用提出的非线性图像重建算法NCPP进行目标重建，实现了远超相机镜头衍射极限及景深限制的长距离、高分辨、大视场显微成像能力。而且，实验验证还发现，即便目标被散射介质遮挡，rPMT亦可清晰成像。

更重要的是，与其他超分辨成像技术不同，rPMT无需使用荧光试剂，也规避了合成孔径、叠层扫描、波前调制等现有的复杂技术途径，这显著降低了rPMT成像系统的复杂性和成本，提高了该技术的实用性和实时性，并赋予了rPMT系统对动态目标的高帧频视频成像能力。rPMT的典型应用场景包括超长工作距离显微成像和远距离微尺度目标探测。

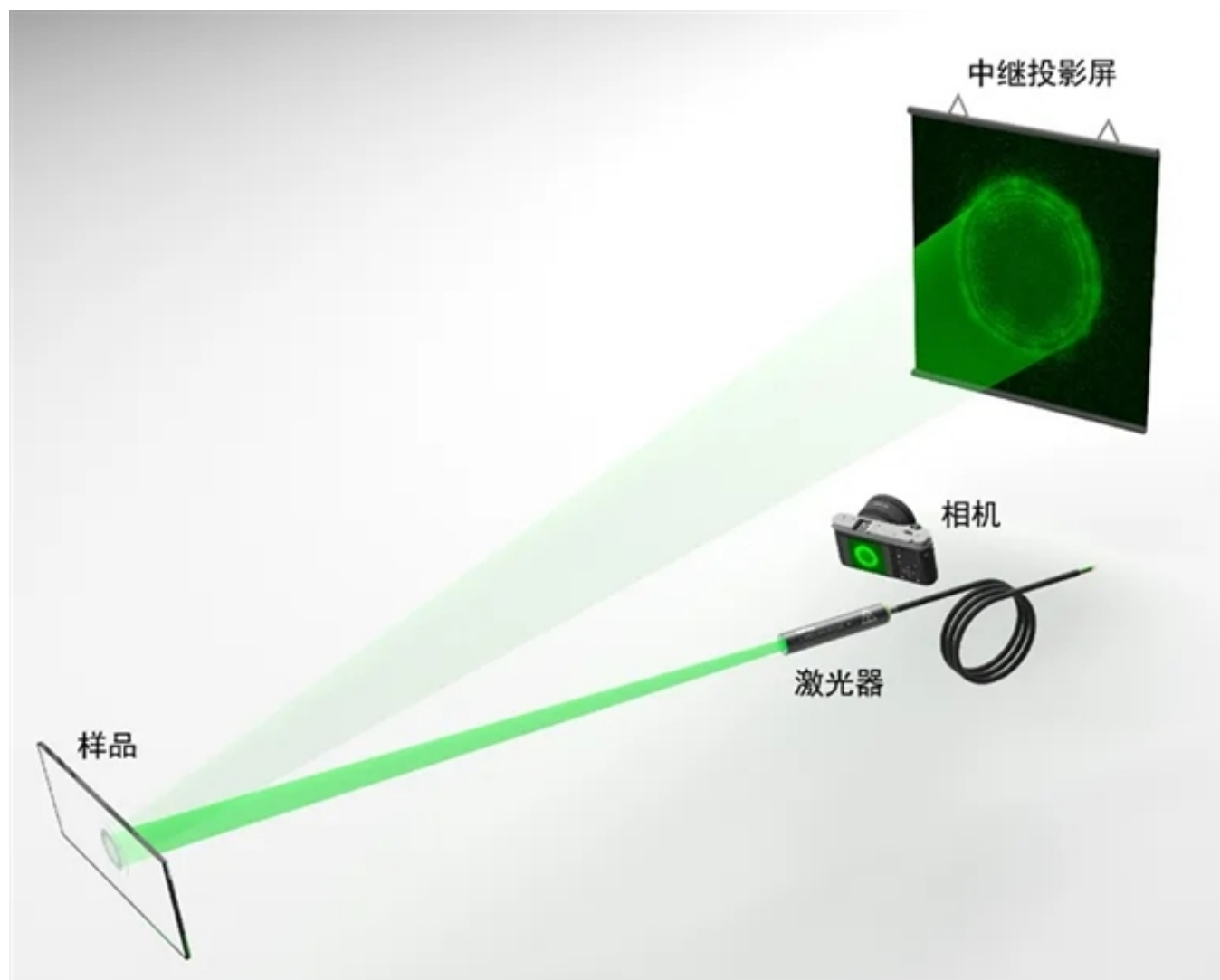


图1. rPMT方法原理图

如图2（a）所示，使用532纳米单色激光对微小目标进行透射式或反射式照明，将目标的衍射功率谱投影于距离目标96.0米外的漫反射白色石灰墙面，并以智能手机（镜头孔径约2 mm）于墙面近处倾斜拍摄白墙上的一幅衍射图案（如图2（b）），无需精准对准和精细调节，rPMT方法实现了对分辨率靶目标和文字目标的清晰成像（如图3（a-c）所示），相较于手机相机镜头的衍射

极限实现了高达364倍的空间分辨率提升。并且，重建目标与真实目标的结构相似度（SSIM）都超过了90%，表明成像质量极高。

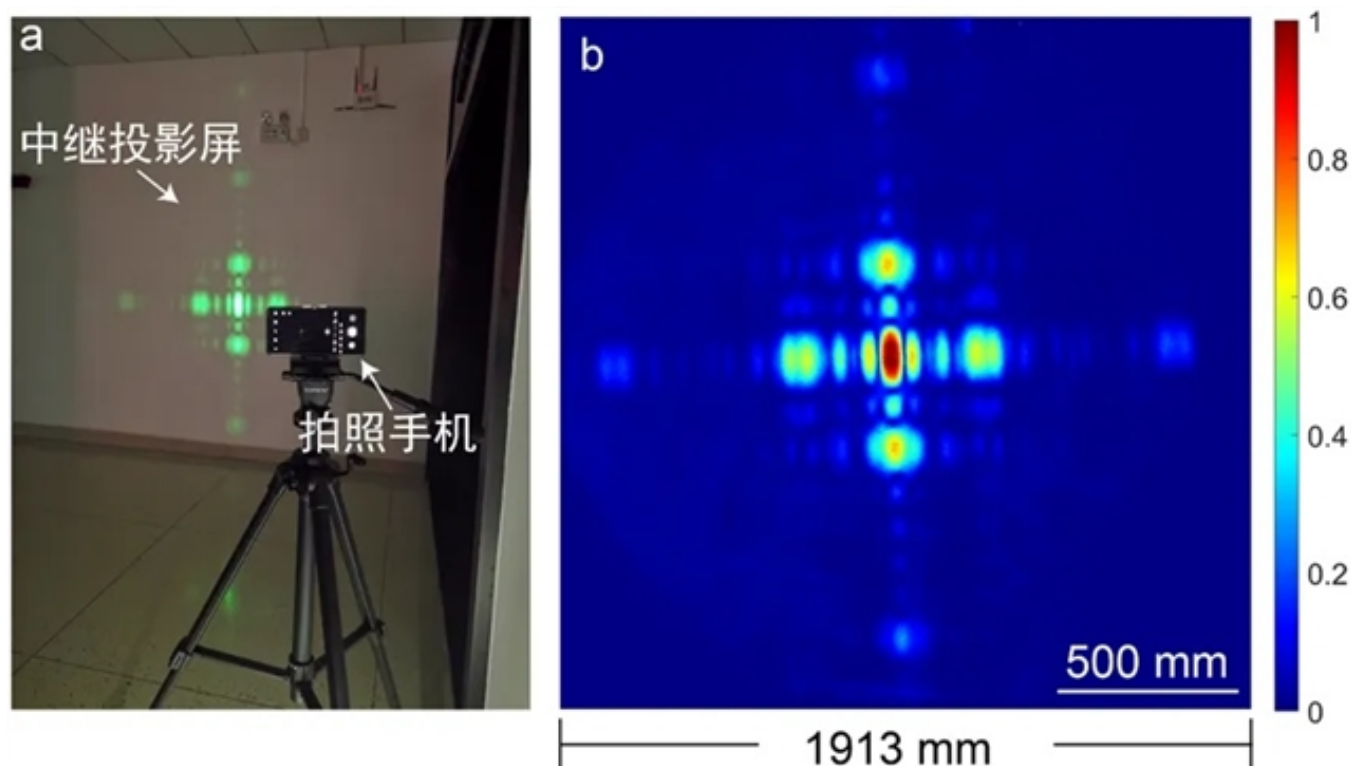


图2. rPMT应用于远距离微尺度目标探测 (a) 实验场景, (b) 拍摄的衍射功率谱图

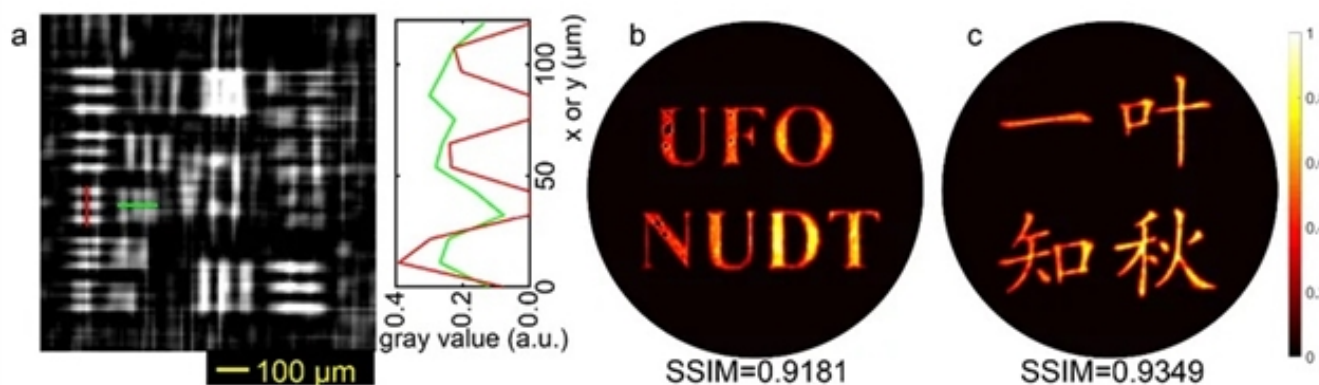


图3. rPMT应用于远距离微尺度目标探测 (a) 分辨率测试, (b-c) 两组重建目标

研究团队采用rPMT技术对生活于玻璃器皿中的活体剑水蚤进行了动态显微成像（如图4(a-e)所示），工作距离达到1米以上，景深超过10厘米，成像分辨率达到2.76微米，视场超过3.3毫米。进一步将相机以连续拍照方式（该相机最大帧频为74 Hz）采集功率谱图像序列并进行重建，获得的重建图像序列可合成为帧频74 Hz的视频，该视频清晰展示了剑水蚤的精细结构和一系列快速运动过程，展示了该技术的活体生物医学显微成像应用价值。

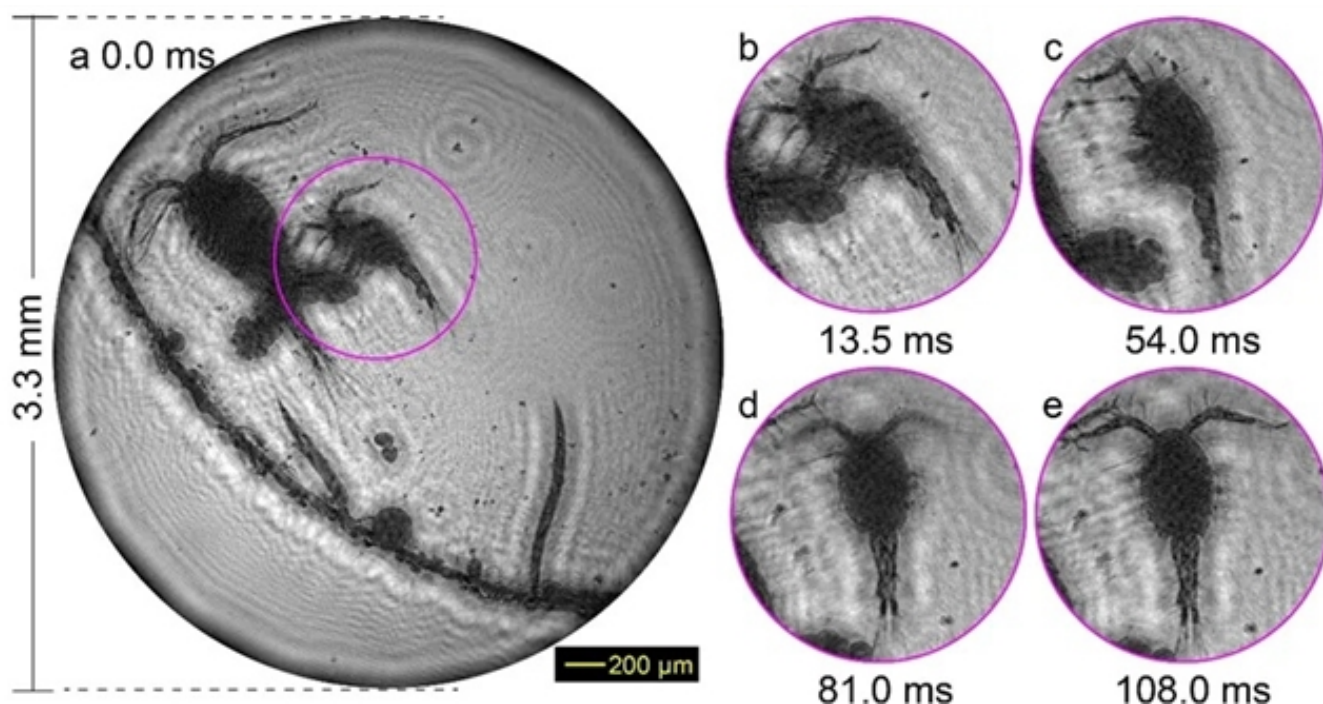


图4. rPMT应用于米级工作距离动态显微成像 (a) 第一帧重建图, (b-e) 另外四帧重建图的局部特写

总结与展望

2014年的诺贝尔化学奖授予了受激发射损耗 (STED) 荧光显微术的发明者, 以表彰他们发明了一种可以突破光学衍射极限的远场光学显微术, 表明光学显微术在生物医学领域有巨大应用价值, 并对人类探索生命的深层次奥秘、提高医学水平具有重要意义。

该研究团队进行的一系列实验验证表明, rPMT技术使用简便易得的设备即可达成远距离、大景深、高分辨、高动态的显微成像, 而无需使用荧光试剂, 也无需其它计算显微成像技术所需的复杂、精确和苛刻的系统装配与成像要求, 一举解决了困扰光学显微成像多年的瓶颈问题。而且, 该技术具有良好的实时性和实用性, 为外科手术中更高性能实时光学显微监测成像装备的实现提供了新的可能性。

总之, 此项研究将推动光学显微成像技术与设备的发展进步, 随着图像探测器的信噪比和动态范围等性能的不不断提升, 该技术将对生物医学研究、半导体制造以及远程诊断等领域产生深远的影响。(来源: LightScienceApplications微信公众号)

相关论文信息: <https://doi.org/10.1038/s41377-025-01800-6>

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: 衣文军等 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