
“零接触”的混响光学相干弹性成像

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/39218.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！

“零接触”的混响光学相干弹性成像。导读

生物组织力学性质（如硬度）在疾病诊断、组织工程及眼科等临床应用中具有重要价值。比如：角膜变硬或变软，往往和眼病有关；肿瘤、纤维化组织，力学性质会明显改变；组织工程里，材料太硬或太软都会影响细胞行为等，那么关键问题是：如何在不损伤组织的前提下，准确测量其力学性质？

光学相干弹性成像（Optical Coherence Elastography, OCE）是一种基于光学相干断层成像（OCT）的无创力学成像技术，可通过追踪组织内机械扰动的传播来定量表征组织的弹性参数。然而，传统波动型 OCE 方法在高度异质或边界复杂的组织中，往往受到波传播方向性和边界反射的显著影响，从而限制了力学对比度和成像稳定性。

混响光学相干弹性成像（Reverberant OCE, Rev-OCE）通过引入多源机械激励，在组织内部形成多方向传播、相互干涉的混响剪切波场，从而显著削弱边界条件对成像结果的影响，在复杂组织中展现出更高的力学对比度与稳定性。然而，现有 Rev-OCE 技术几乎全部依赖于直接或间接接触式机械激励（如压电探头、耦合介质或声辐射力透射），这在眼角膜等高度敏感组织的体内应用中存在潜在风险，限制了其临床转化。

针对这一关键问题，美国休斯顿大学生物医学工程系Kirill V. Larin教授团队提出并实现了一种基于空气耦合超声（Air-Coupled Ultrasound, ACUS）的真正零接触式 Rev-OCE 新方案。该方法利用多个低频 ACUS 换能器在空气中工作，通过在样品表面产生声辐射力，在无任何物理接触或耦合介质的情况下，间接激发组织内部稳定的混响剪切波场，从而实现零接触混响光学相干弹性成像。相关成果以题为Air-coupled ultrasound based noncontact reverberant optical coherence elastography发表于Light: Advanced Manufacturing。

小百科1：光学相干弹性成像（OCE）

光学相干弹性成像（Optical Coherence Elastography, OCE）是一种由光学相干断层扫描（OCT）技术发展而来的高分辨率、无创生物医学功能成像技术，其核心是：在获取组织微观结构信息的同时，引入可控的机械扰动，并通过光学方式精确测量组织的微小形变或波动传播过程，从而反演组织的弹性或硬度等力学参数。相较于传统影像手段，OCE 能够提供结构 + 力学功能双重信息，在疾病早期诊断、基础生物力学研究及临床评估中展现出重要潜力。

非接触混响光学弹性成像激励机制

该研究提出了一种在物理机制上清晰且安全的思路：不与组织发生任何机械接触，仅利用空气中的超声波，在样品表面产生声辐射力，从而激发组织内部的机械响应。

在 Rev-OCE 框架下，作者引入空气耦合超声换能器阵列作为机械激励源。实验中，5个空气耦合超声换能器均匀安装于 3D 打印环形支架中，并布置在样品表面上方约 10 mm 处（图1）。由于空气与生物组织之间存在显著声阻抗失配，入射声能的大部分在组织表面被反射并转化为辐射力，从而在无需耦合介质的条件下有效激发剪切波场，同时显著降低了传统超声透射可能对组织带来的能量沉积风险。

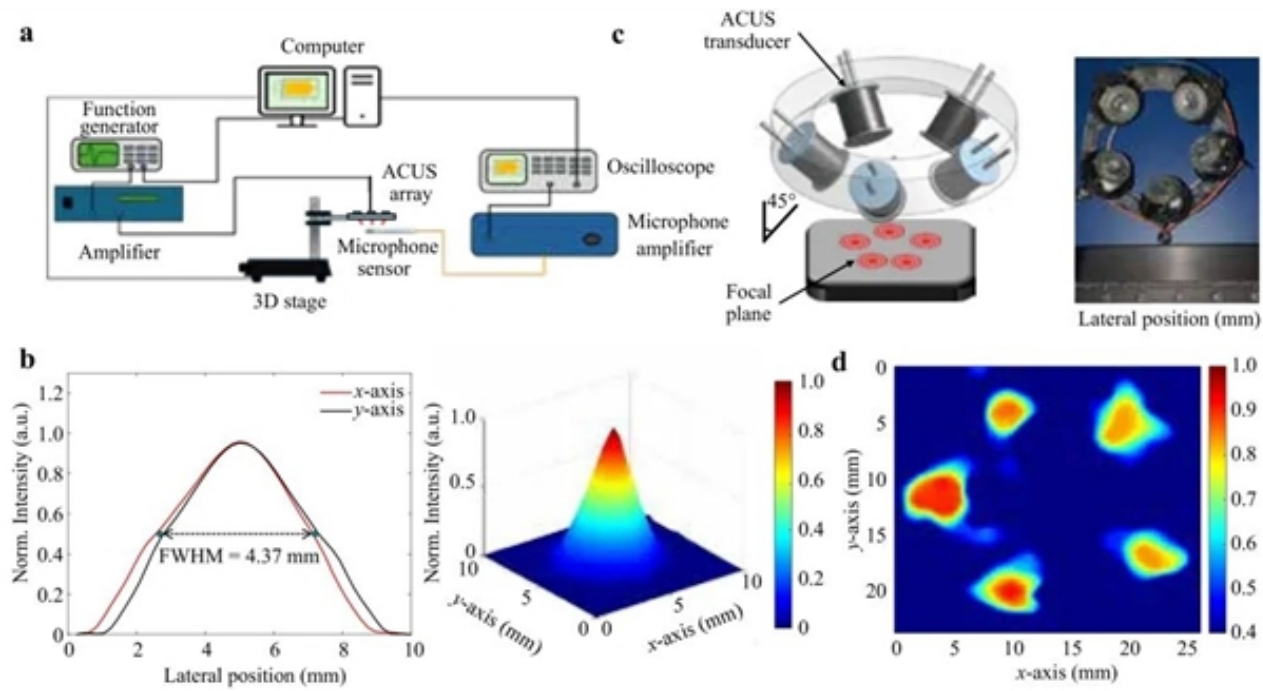


图1：ACUS 混响装置的示意图及属性

（a 单个 ACUS 换能器声压力场测量装置示意图；b 单个换能器焦平面的归一化声压分布；c ACUS 阵列及 3D 打印固定环的 结构示意图及实物图像；d 五个换能器阵列在 xy 焦平面产生的归一化声压分布。）

稳定混响剪切波场的构建与实验验证

研究团队系统表征了单个及多换能器阵列产生的声压分布，结果表明：五换能器阵列能够在样品区域内形成稳定且相对均匀的混响声场。结合相位敏感光谱域 OCT（PhS-SDOCT），作者成功获取了组织内部多时刻的轴向粒子速度分布，并基于标准 Rev-OCE 自相关分析模型，定量反演剪切波速度。

实验一：异质明胶仿体中的力学成像验证

作者首先构建了由不同明胶浓度组成的异质仿体模型：：一侧为 4%（w/w）明胶，另一侧为 8%（w/w）明胶，分别模拟力学性质较软和较硬的组织区域。在空气超声激励下，利用 OCE 系统对仿体内部剪切波传播进行成像。实验结果显示：软区剪切波传播速度明显低于硬区，两种区域的力学差异被清晰分辨。基于速度剖面的定量分析，该方法实现了 $208.8 \pm 72.4 \mu\text{m}$

的横向力学分辨率，其空间分辨能力与已报道的多种接触式 Rev-OCE 方法处于同一量级，在完全非接触条件下展现出良好的成像性能。

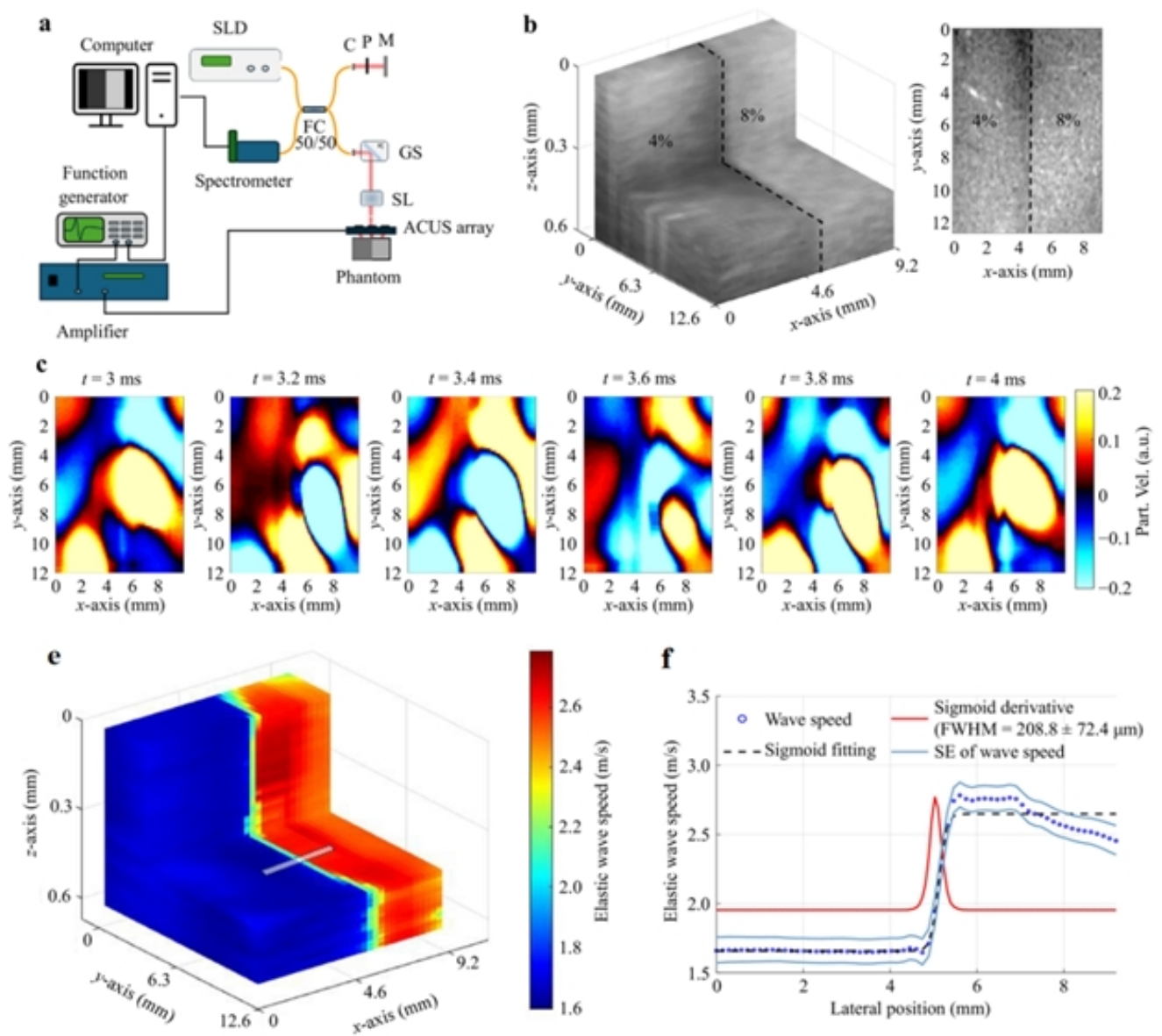


图2：异质明胶仿体的Rev-OCE成像

实验二：猪角膜分层力学特性的非接触式成像验证

为进一步验证该方法在真实生物组织中的适用性，作者进一步在ex vivo猪角膜 样本上开展实验，在不接触角膜，不用水或凝胶等耦合介质的情况下，仅通过空气超声激励对角膜进行力学成像。

在人工眼压维持于10 mmHg的条件下，ACUS-Rev-OCE 成功在角膜内建立混响剪切波场，并解析出明显的深度依赖性力学特征：前层（上皮层与前基质区域）表现出更高的剪切波速度（约 3.7 m/s），而后层（后基质与内皮层）则相对柔软（约 2.2 m/s）。该结果与已有的角膜生物力学研究结论一致。

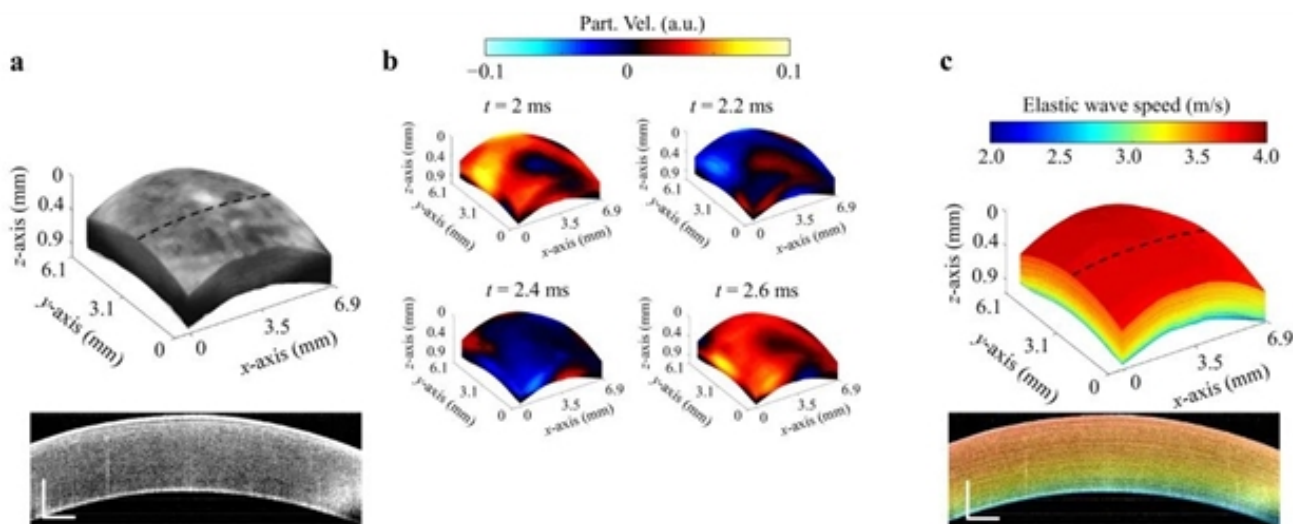


图3：猪角膜的Rev-OCE成像测试

安全性评估表明：该系统的空间峰值脉冲平均强度（ $SPPA \approx 0.05 \text{ W/cm}^2$ ）及机械指数（ $MI \approx 0.003$ ）均显著低于眼科超声应用的安全阈值，验证了其潜在体内应用的可行性。

总结与展望

本文报道了一种基于空气耦合超声的完全非接触混响光学相干弹性成像方法。该技术在无需任何物理接触或耦合介质的情况下，实现了稳定的混响剪切波场激发，并在异质仿体和生物组织中验证了其力学成像能力与安全性。

需要指出的是，当前 Rev-OCE 仍依赖多点 M-mode 数据采集，成像速度在体内实时应用中仍存在一定限制。未来，结合超高速 OCT 系统或 B-mode Rev-OCE 成像策略，有望进一步提升成像效率；同时引入更先进的剪切波速度反演算法，也有助于提高定量精度。

总体而言，该研究为 Rev-OCE 的临床转化提供了一条新的技术路径，其完全非接触、安全性高且系统实现相对简洁的特点，使其在眼科、生物力学表征及软组织成像等领域展现出广阔应用前景。（来源：先进制造微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.37188/lam.2025.076>

作者：Kirill V. Larin 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](https://www.iikx.com)转发