
双模态光学成像系统精准鉴别乳腺组织良恶性

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/37437.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！

双模态光学成像系统精准鉴别乳腺组织良恶性。 导读

乳腺癌是全球女性高发的恶性肿瘤之一，其中手术彻底切除肿瘤是关键治疗手段，而精准识别肿瘤边界则是避免残留、减少二次手术的核心前提。传统术中诊断依赖冷冻切片或医生触诊，存在耗时久、主观性强及难以实时指导等局限，因此亟需开发高效的术中组织鉴别技术。

现有组织鉴别方法主要分为两类：基于光谱特性的成像技术（高光谱成像 HSI）和基于弹性特性的检测技术（弹性成像）。高光谱成像通过分析不同组织的光谱吸收差异实现区分，可识别肿瘤边界，但易受病理染料污染影响；弹性成像则利用肿瘤组织比健康组织更坚硬的特性进行判断，不受染料干扰，但对薄样本测量准确性不足，且难以精准勾勒肿瘤边界。单一模态技术的固有缺陷，导致临床中组织鉴别的可靠性和适用性受限。

为突破这一瓶颈，斯图加特大学 Andrea Rüdinger 团队及合作者提出一种新型双模态测量系统，创新性地将高光谱成像（HSI）与弹性成像傅里叶变换轮廓术（FTP）相结合。该系统通过共享成像路径、整合两种模态的互补信息，既发挥 HSI 在薄样本检测时肿瘤边界识别上的优势，又借助 FTP 克服染料污染和弹性特性检测的难题，实现健康与恶性乳腺组织的精准、稳健鉴别。该成果发表于 Light: Advanced Manufacturing，题为 Bimodal tissue differentiation using hyperspectral imaging and elastographic Fourier transform profilometry。该工作为术中精准诊断和术后病理分析提供了新工具。

小百科1：什么是高光谱成像？

高光谱成像（Hyperspectral Imaging, HSI）是一种先进的光学成像技术，与普通 RGB 成像仅捕捉红、绿、蓝三个波段不同，高光谱分辨率能将光分解为数十至数百个连续的窄光谱通道（本研究达 101 个），且光谱覆盖可见、近红外至短波红外波段（450-1450nm），这意味着每种物质的光谱指纹能被完整捕捉，其识别精度远超多光谱。

由于不同组织的细胞结构、生化成分不同，对不同波长光的吸收和反射特性存在差异，能形成独特的光谱指纹。本文通过高光谱成像捕捉这种指纹来区分健康组织与肿瘤组织，甚至精准识别肿瘤边界。优势在于非接触、无标记，但易受表面污染物影响。

小百科2：什么是弹性傅里叶变换轮廓术？

弹性傅里叶变换轮廓术（Elastographic Fourier Transform Profilometry, FTP）是一种无接触式弹性测

量技术，核心是通过分析组织在外部压力下的变形行为判断其硬度。

该技术通过投射条纹图案到组织表面，用空气射流脉冲施加轻微压力，再利用傅里叶变换分析条纹的相位变化，计算组织的压痕深度。肿瘤组织硬度高，压痕深度小；健康组织硬度低，压痕深度大，据此可实现组织鉴别。其优势在于不受表面染料影响，但对样本厚度有一定要求，且难以精准定位肿瘤边界。

1 双模态系统设计：HSI + 弹性FTP的双重检测

该系统由两套独立子系统和一条联合成像光路组成（如图1），两个模块无缝集成，可对同一组织区域同时采集光谱和弹性数据，为联合分析提供基础，保证数据的空间一致性，结构紧凑且功能协同。

高光谱成像（HSI）模块：采用卤光源（Thorlabs OSL2IR）提供 450-1450nm 宽光谱，通过定制单色仪拆分出 101 个窄光谱通道（横向分辨率：VIS/NIR 约 $22\ \mu\text{m}$ ，SWIR 约 $56\ \mu\text{m}$ ），搭配可见/近红外和短波红外双相机，捕捉组织在不同波长下的反射光谱指纹。

弹性成像 FTP 模块：以 625nm 光纤耦合 LED 为光源，投射条纹图案到组织表面，通过膀胱镜镜头喷射空气射流按压组织，记录 20 秒内的组织变形过程，再利用傅里叶变换轮廓术解析相位变化，量化组织弹性硬度。

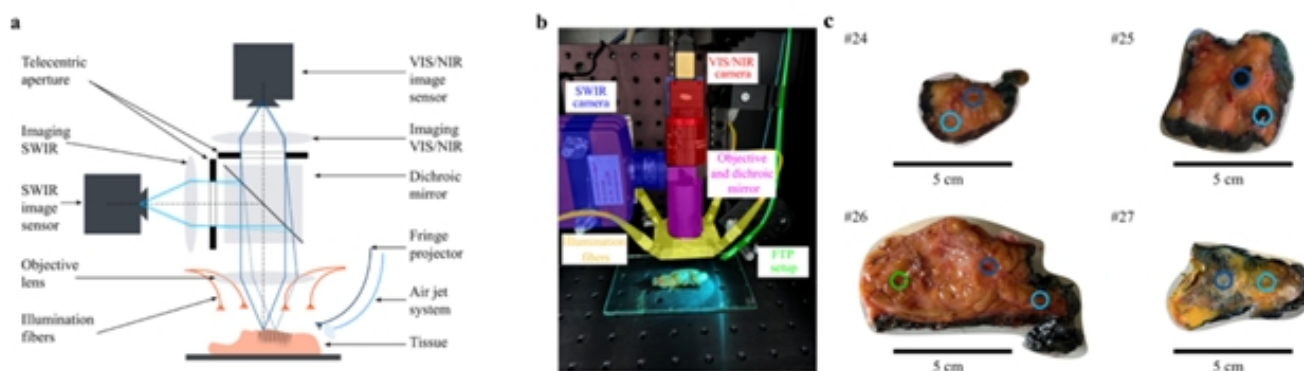


图1：双模态系统设计示意图（a），实验装置（b），患者组织切片（c）

研究对象：同时接受 HSI 和 FTP 两种方式测量方式的4名患者，年龄在 37-61 岁，临床诊断为 cT1、cT2 或 cT3 期乳腺肿瘤，其中一半患者接受过新辅助激素治疗。

实验流程与数据处理：肿瘤手术切除后，先分析原生组织，由病理学家将其切成薄片；取一片肿瘤薄片置于样本板，送至传感系统（见图 1b）；每种测量方式均对薄片的疑似肿瘤区和健康区进行测量（测量位置用深蓝色标注肿瘤区、浅蓝色标注健康区，见图1c）

2 关键技术原理：从光谱差异到硬度区分

高光谱成像的鉴别（光谱差异）

不同组织在特定波长下的反射率存在特征差异，从图2可以明显观测到健康乳腺组织在可见区反

射率较低、短波红外区较高；而肿瘤组织因细胞密度大、血管丰富，呈现可见区反射率高、短波红外区吸收强的特征，尤其在 980nm 和 1200-1300nm 波段差异最为显著。

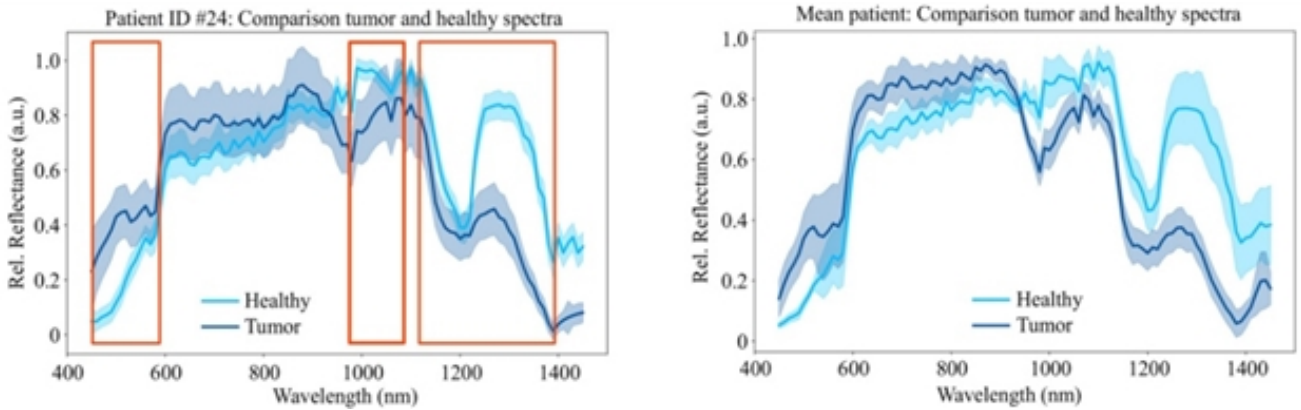


图2：患者高光谱成像图（左为24号患者，右为患者均值）

系统通过校正暗电流、传感器灵敏度和光照不均，提取组织像素级光谱，再经支持向量机（SVM）分类，能精准识别组织类型，其中健康与肿瘤组织区分准确率达 83%，F1 分数 85%，能精准识别肿瘤边界，但受病理染料污染时无法有效判断。

弹性成像 FTP 的鉴别（硬度区分）

肿瘤组织因胶原蛋白沉积、细胞排列致密，硬度显著高于周围健康组织（尤其是脂肪组织）。当空气射流按压时，健康组织变形量大（相位变化明显），而肿瘤组织变形量小（相位变化微弱），通过分析时间 - 相位曲线可量化这种差异。

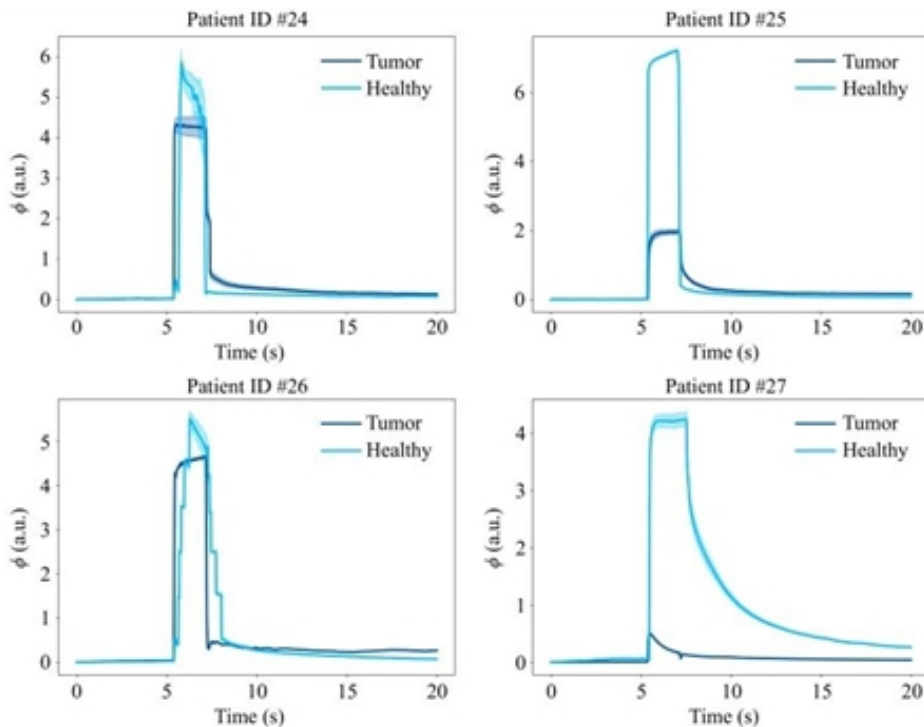


图3：四名患者组织弹性压痕曲线

作者对每位患者进行了五次弹性成像FTP测量，以分析时间噪声的影响，从图3的测量结果可以看出健康组织变形量均大于肿瘤组织，尤其是患者#25和#27。通过压痕深度阈值法，肿瘤组织识别精确率达 80%，不受染料污染影响。但与HSI系统相比，相位图（图4）无法清晰勾勒肿瘤边界，而只产生相对于静止组织表面的深度图。

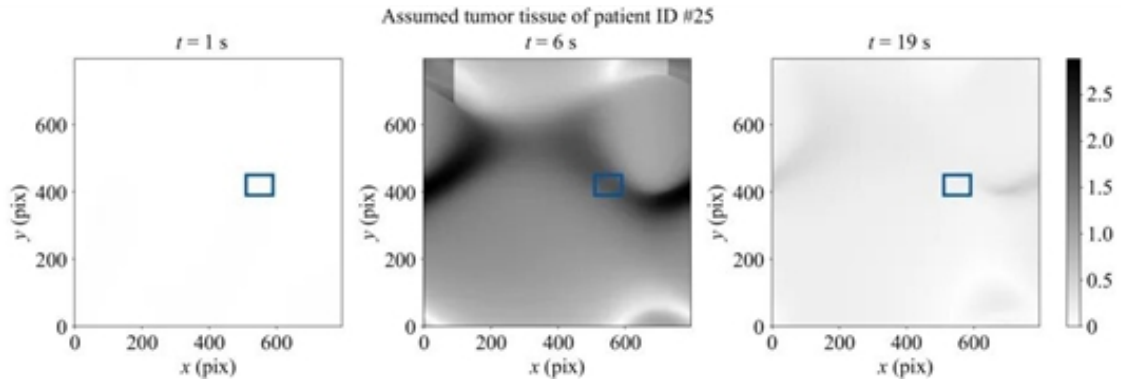


图4：#25患者不同时间的压痕相位图

3 双模态互补验证：1+1>2 的鉴别效果

两种模态的互补性在复杂场景中凸显（图5）：

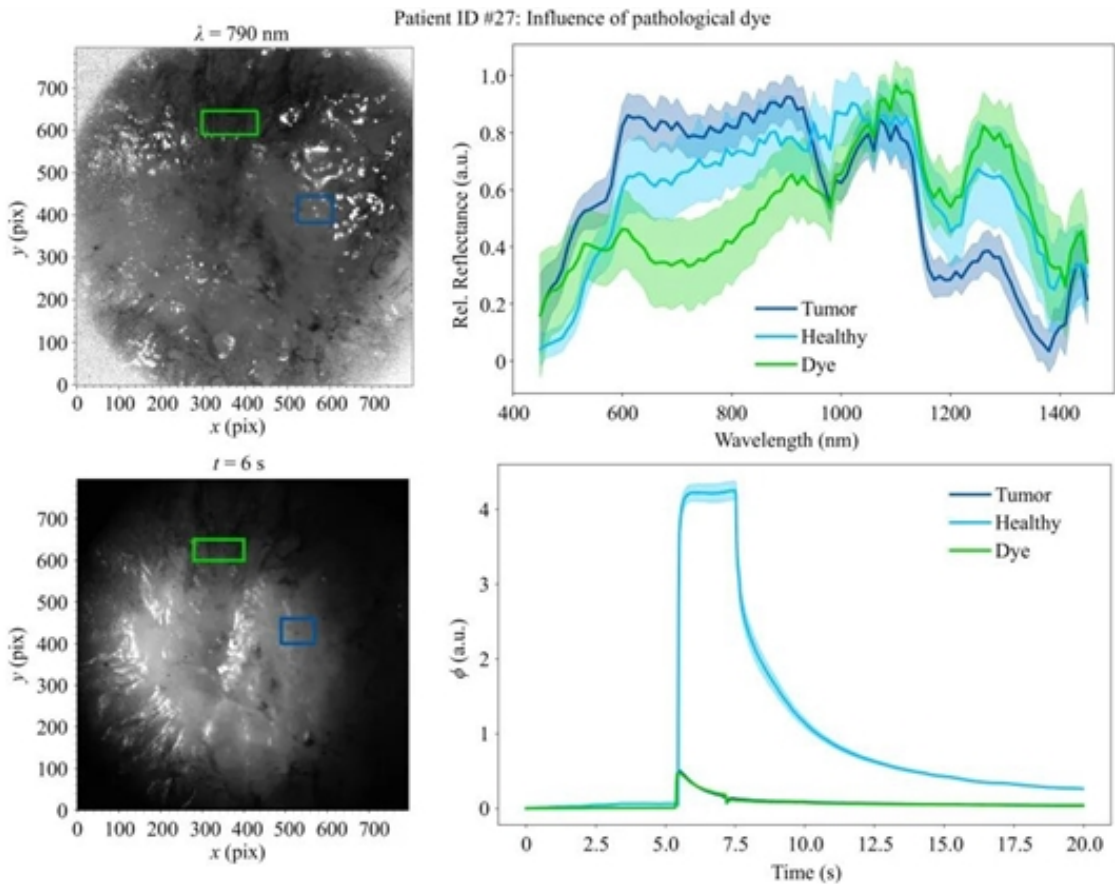


图5：HSI（上）和FTP（下）对#27病理性染料的表征

应对染料污染：当组织表面有病理染料残留时，HSI失效，但弹性成像 FTP 仍能准确区分组织类型（肿瘤与染料污染区域的压痕曲线重叠，可明确判定）；适配薄样本：弹性成像 FTP 对薄样本测量不准确时，HSI可通过光谱特征实现有效鉴别；提升可靠性：通过 光谱识别 + 弹性验证的互证逻辑，规避单一模态的误判，临床兼容性强，尤其在组织成分复杂（如含结缔组织）的区域，鉴别准确性显著提升。

挑战与展望

该双模态系统的核心价值在于突破单一模态的技术瓶颈，通过多维度信息融合提升组织鉴别的稳健性和准确性，为乳腺癌等癌症的术中精准诊断提供了新的技术路径，随着技术迭代，该双模态系统有望成为乳腺癌保乳手术中的精准导航工具，减少不必要的组织切除，降低复发率。

本研究虽为组织鉴别提供了创新的技术方案，但该系统仍处于实验室验证阶段，仍有进一步优化空间，未来可从以下三方面推进：

拓宽应用场景：目前仅基于 4 名患者样本验证，未来需纳入更多样本，涵盖不同组织学类型的乳腺癌，如小叶癌、导管原位癌（DCIS）等特殊病理类型的样本测试，验证系统对不同亚型乳腺癌的鉴别能力。

优化样本适应性：针对极薄组织样本，改进 FTP 的压力控制算法；针对术中出血、组织湿润等场景，优化 HSI 的抗干扰能力。

实现临床转化：优化光学组件，将系统集成到内窥镜探头，缩短数据处理时间（当前需离线分析），满足术中实时诊断的时间要求。（来源：先进制造微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.37188/lam.2025.073>

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：Andrea R ü dinger 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