# 郜鹏左超 LAM 综述 三维折射率成像

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：https://www.iikx.com/news/progress/42999.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！*

**郜鹏左超 LAM 综述 三维折射率成像**。 Light: Advanced Manufacturing 综述解读

西安电子科技大学郜鹏团队 南京理工大学左超团队

三维折射率成像：技术与应用

折射率（RI, refractive index）是描述物质光学性质的重要参数，与样品形貌、密度、应力和化学组成等信息密切相关。三维折射率成像能够在无需荧光标记的条件下，对透明或弱散射样品的内部结构进行定量三维表征，在细胞生物学、病理学、血液学、微生物学、材料科学和工业检测等领域具有重要应用价值。

近期，西安电子科技大学郜鹏教授课题组联合南京理工大学左超教授课题组，以Optical diffraction tomography for 3D refractive index imaging: Techniques and applications为题，在Light: Advanced Manufacturing发表综述文章。文章系统梳理了光学层析成像（OT, Optical Tomography）与光学衍射层析成像（ODT, Optical diffraction tomography）的基本原理、实验实现、重构方法和典型应用，并展望了高速化、高精度化、智能化和多模态融合的发展趋势。

三维折射率成像

基于OT/ODT的三维折射率成像，通过旋转照明或样品，结合全息或单光束相位恢复方法获取透射波前，并利用基于滤波反投影或衍射层析理论实现三维折射率成像（图1）。OT和ODT核心差异在于重建模型：OT（图1a）采用傅里叶切片定理，与X射线CT原理类似，将相位近似为折射率的投影线积分，计算高效但忽略衍射效应；ODT则基于傅里叶衍射定理，能更准确描述弱散射样品中的光场衍射传播，适用于高精度三维折射率重构。

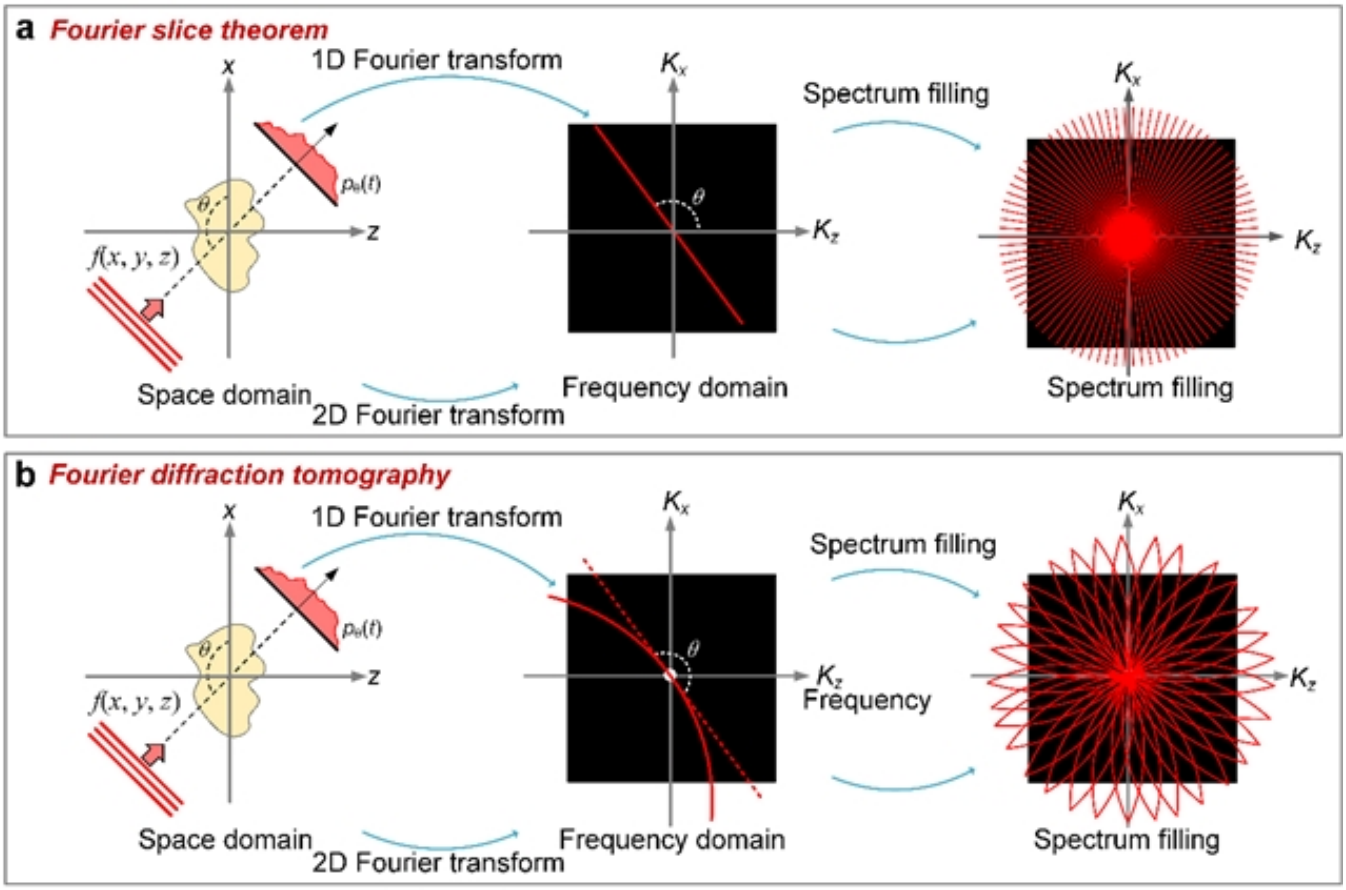



图1：基于OT或ODT的三维折射率成像原理与流程。(a) 基于OT的三维折射率成像；(b) 基于ODT的三维折射率成像。

三维折射率成像工作流程

基于OT或ODT的三维折射率成像通过旋转照明或样品，采集多角度定量相位图像，再经滤波反投影（忽略衍射）或Wolf衍射层析理论（考虑衍射）重建三维折射率分布。

1. 照明策略与复振幅获取

OT或ODT成像过程主要涉及照明策略和复振幅获取技术：

— 旋转照明：扰动小，适用于活细胞，但存在缺失锥，轴向分辨率各向异性；

— 旋转样品：频谱覆盖更均匀，各向同性更好，但对样品形态和机械稳定性要求高；

— 混合调制：可扩展频谱覆盖，但增加系统复杂度与采集时间。

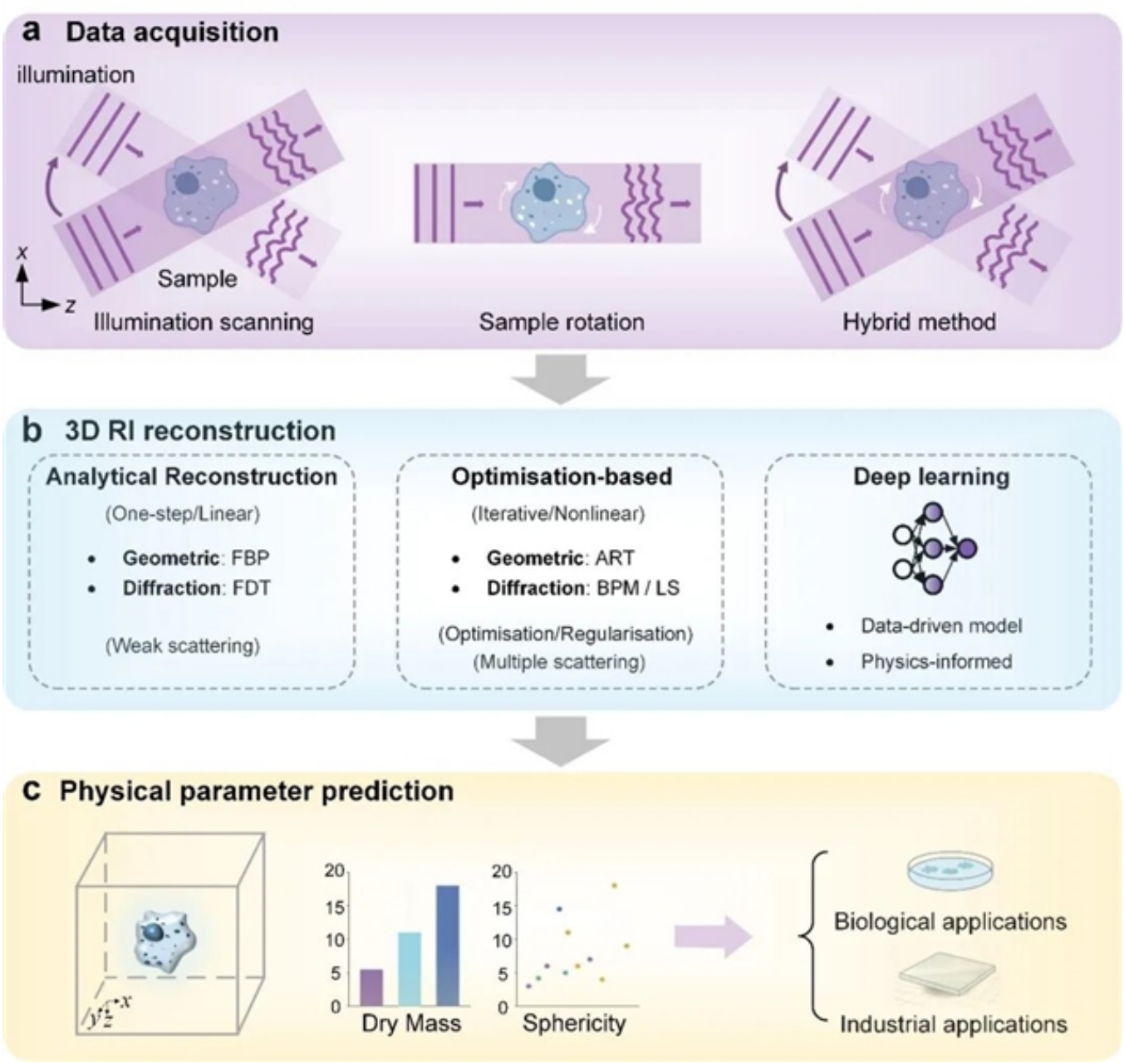



图2：三维折射率成像与重建流程的示意图。该流程主要包括三个阶段：(a) 数据采集：采用旋转照明、旋转样品或混合策略获取多视角投影信息；(b) 重建算法：通过几何光学方法，例如滤波反投影和代数重建；基于衍射的模型，例如傅里叶衍射定理和光束传播方法；或新兴的深度学习框架，以恢复样品的三维折射率分布；(c) 基于三维折射率分布的信息提取：细胞干质量、球形度等物理参数解析。

2. 复场获取方法

复场获取方法分为三类：

— 干涉型（如数字全息显微术）：相位灵敏度高，是ODT主流方案；

— 折射型（如Shack-Hartmann波前传感器）：结构简单、稳定性好；

— 衍射型（如FPM）：仅需强度图像即可恢复相位，利于系统简化、降噪与提升稳定性。

3. 重建方法与参数提取

重建方法主要有三类：

— 解析法：基于明确物理模型，计算快，但限于弱散射样品；

— 迭代优化法：可建模复杂散射，精度高，但计算成本大；

— 深度学习法：重建速度快，能抑制缺失锥伪影、突破分辨率限制，但泛化性与可解释性仍待提升。

在重建三维折射率分布后，可以进一步提取干质量、体积、球度和RI异质性等物理参数，以提供生物分析和工业检测的定量描述。

从生命科学到工业检测

基于OT和ODT的三维折射率成像具有无标记、定量和三维可视化的优势。在生命科学中，OT/ODT可用于单细胞三维折射率成像，定量分析红细胞形态、细胞干质量、细胞器分布和细胞动态过程；在亚细胞尺度，还可揭示细胞核、脂滴、核仁、线粒体、丝状伪足等结构的空间分布，并与荧光显微、结构光照明显微等技术形成互补。

此外，三维折射率成像在材料科学和工业检测中同样具有重要价值。许多光学元件和透明材料的功能直接取决于内部折射率分布，例如光纤、梯度折射率透镜、微透镜和聚合物微结构等。ODT能够在非破坏条件下获取样品内部的三维折射率信息，可用于内部缺陷检测、密度不均匀性分析和结构完整性评估。

总结与展望

现阶段，光学衍射层析成像理论架构日趋完善，技术体系已趋于成熟，目前已在生命医学研究、透明介质表征、精密光学器件无损检测等诸多领域得到广泛应用，具备坚实的研究基础与完备的实践应用场景。

在现有研究成果之上，该技术将持续朝着高速数据采集、高保真各向同性三维重建、多模态成像融合等方向稳步推进，进一步实现物理成像机制与智能重构算法的深度协同。伴随光场调控、复振幅探测及三维重建方法的持续迭代优化，光学衍射层析成像有望进一步拓展应用边界，在生命科学基础探究、高端微纳结构评测、新型功能材料研发等前沿领域发挥更为关键的支撑效能，推动无标记定量三维成像技术实现更高层次的发展，助力相关领域前沿研究与产业技术迭代升级。（来源：先进制造微信公众号）

相关论文信息：https://doi.org/10.37188/lam.2026.077

作者：郜鹏 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