

---

# 巧用光学“缺陷”实现显微单步快速对焦

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/41397.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！

巧用光学“缺陷”实现显微单步快速对焦。 导读

近日，国防科技大学的翟永平课题组在Light: Advanced Manufacturing上发表了题为SparseFocus: learning-based one-shot autofocus for microscopy with sparse content的研究论文。

该研究针对光学显微成像领域中高动态目标追焦及百亿像素级全切片扫描成像面临的对焦难题，提出了一种革命性的解决方案。团队开发的SparseFocus方法，充分利用了非理想光学成像系统点扩散函数（PSF）不对称的固有缺陷，仅需单次曝光（one-shot）即可精准估计离焦距离及方向，精度高达百纳米量级。SparseFocus方法的另外一个重大贡献是通过巧妙的算法设计，解决了被动式对焦方法在面对稀疏样本时可靠性断崖式下降的致命缺陷，彻底破除了被动式对焦对图像内容极度敏感的魔咒，将one-shot对焦的可靠性提升到了前所未有的高度，将极大推动one-shot对焦在高通量病理诊断、半导体晶圆缺陷检测等领域的应用。

研究的价值不止于算法创新，团队将SparseFocus集成，开发了一套光机电算高度一体化的智能全切片扫描成像系统（Whole Slide Imaging, WSI）。与传统WSI系统需要预先选取大量预对焦点、通过爬山方法及插值生成对焦地图的繁琐流程不同，新系统能够对扫描视野进行实时、快速的单曝光对焦，并同步实现扫描及百亿像素级海量图像拼接，实现了从算法创新到应用落地的全闭环。

## 一、巧用光学缺陷：点扩散函数不对称性提供关键线索

在理想光学成像模型中，显微镜的点扩散函数（PSF）关于焦平面对称，这意味着从一张离焦图像中无法判断样品是位于焦平面前方还是后方。然而，研究团队指出，在实际的光学显微镜系统中，由于载玻片、样品、盖玻片、空气或浸油等介质间的折射率不匹配，会引入球差、彗差、像散等复杂像差，导致实际的PSF呈现显著的不对称性。

正是这种通常被视为成像缺陷的光学特性，为被动式单步（one-shot）对焦提供了物理基础。位于焦平面前后、离焦距离绝对值相同的两张图像，会呈现出细微的特征差异。研究团队所提出的算法正是通过捕捉和学习这种由PSF不对称性导致的细微特征，单次曝光即可完成离焦距离和方向的精确计算，在直线电机（或压电陶瓷、音圈电机等）及高精密伺服运动控制系统的作用下即可快速找到焦平面，相比传统爬山方法对焦速度提升了数10倍。这种单步即成的特性，使其能够被应用于高动态目标追踪、实时飞拍系统等对时序要求极端苛刻的场景，而传统的迭代式方法在此类场景中完全无法适用。

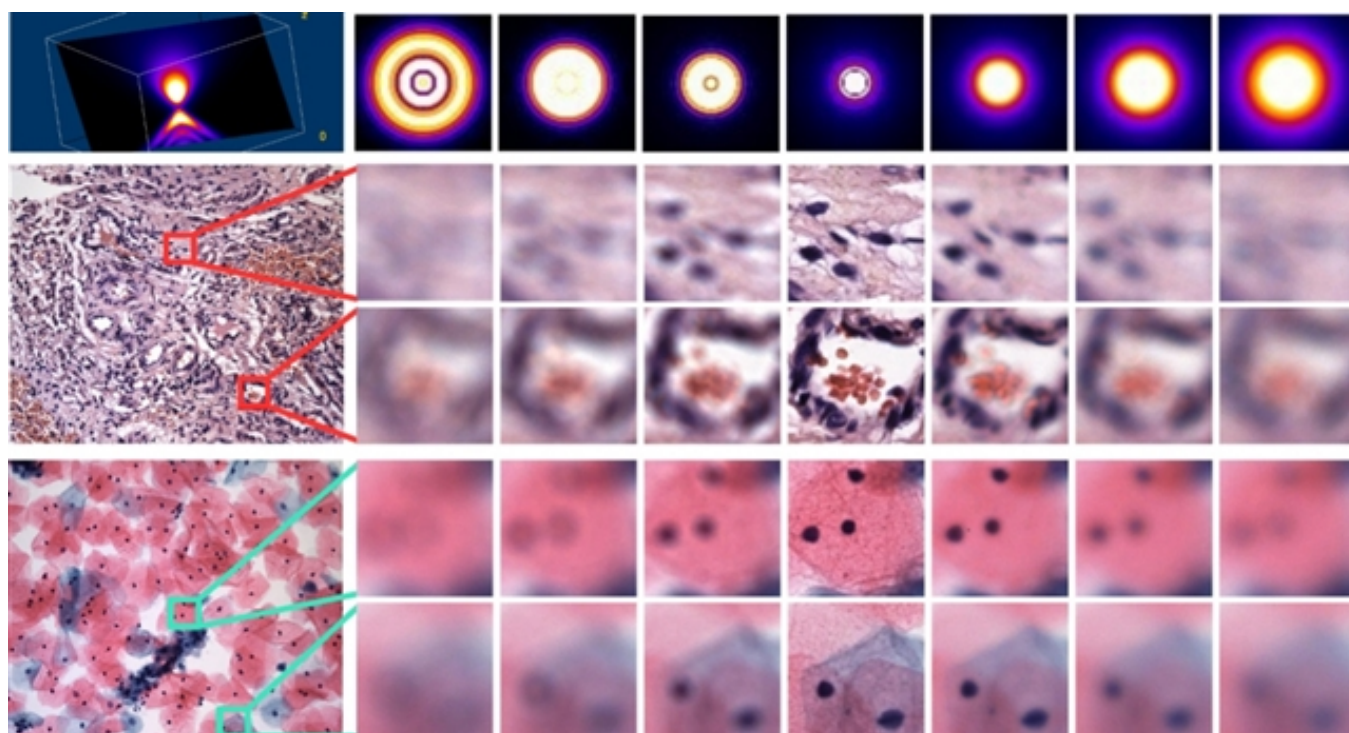


图1：PSF呈现不对称性示意图

## 二、被动式对焦的阿喀琉斯之踵：当样本内容变得稀疏

然而，速度的提升并非终点，速度与可靠性双高才是研究团队追求的终极目标！无论是高动态的活细胞追踪，还是数据量高达百亿像素级的全切片扫描成像WSI（Whole Slide Imaging），对焦的可靠性直接决定了成像质量及最终任务的成败。通过对大量数据的分析，研究团队发现，无论是需要多次机械扫描、效率低下的传统迭代式爬山方法，还是新兴的被动式one-shot对焦方法，都存在一个致命缺陷：对图像内容本身极为敏感，尤其在面对内容稀疏的样本时，可靠性会急剧恶化。然而，现实中的样本往往并不友好——当所观察的目标相比观察视野极为弱小时，或者在WSI成像中由于制片技术的差异、细胞萎缩等原因，很多视野往往仅有极少量的有形成分，这种内容稀疏的场景，成为了高可靠自动对焦技术的阿喀琉斯之踵。

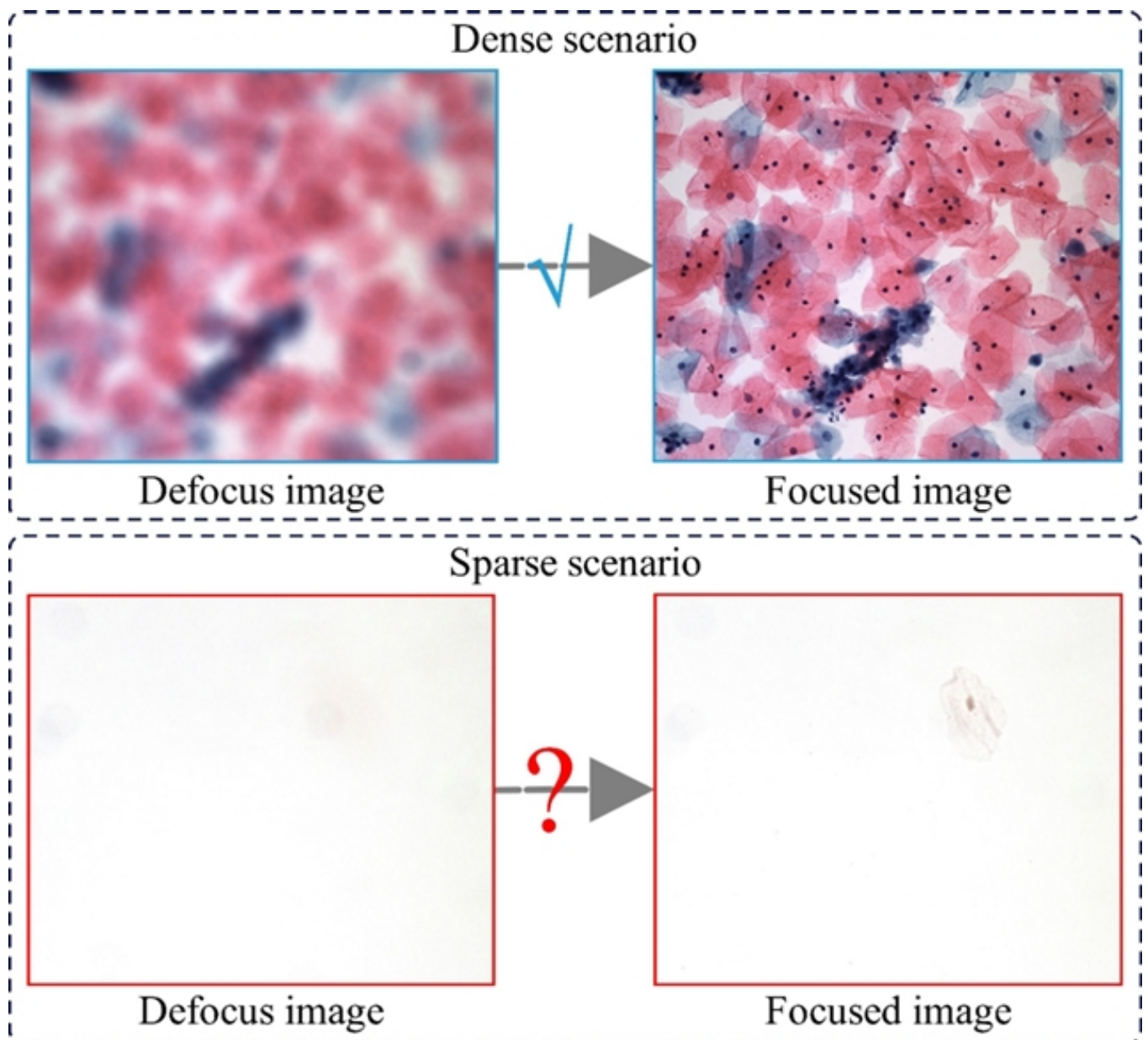


图2：内容稀疏时自动对焦面临极大挑战示意图

### 三、慧眼识重点：两阶段智能对焦网络

为了解决稀疏内容场景下的one-shot对焦可靠性问题，研究团队提出了名为 SparseFocus 的两阶段对焦框架。其核心思想是模仿人类观察者的策略：先快速扫视全局，找到有价值的细节，再凝神于这些细节进行精确对焦。

第一阶段是区域重要性网络。该网络如同一个注意力筛选器，对输入的离焦图像进行快速评估，为图像中的每个局部区域分配一个重要度权重。内容密集、特征丰富的区域获得高分，而空白或信息稀少的区域则得分很低。

第二阶段是离焦预测网络。系统仅选取重要性得分最高的前K个区域，送入这个专门的网络进行离焦距离的精确计算。最后，通过对这些关键区域的预测结果进行聚合（如中值滤波），得到整

张图像最终的离焦距离估计。

这种方法摒弃了对图像所有区域一视同仁的平均主义策略，使计算资源和模型注意力能完全集中在能体现离焦信息的区域上，从而在根源上克服了稀疏区域的干扰。

需要重点指出的是：不同于清晰图像，离焦图像中内容区域跟非内容区域的特征差距非常小，而且容易受到光路中灰尘、噪声等因素的影响，导致离焦图像（尤其是深度离焦图像）中内容重要度的检测评估难度极高，研究团队通过巧妙利用清晰—离焦图像对的清晰度差异进行重要度标注，并设计了内容重要度网络去捕捉相关信息，从而解决了这一难题。

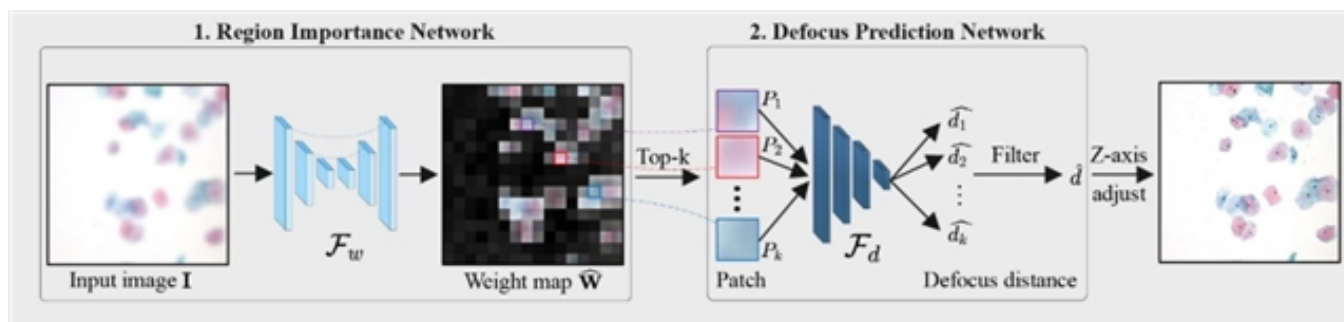


图3：两阶段智能对焦网络示意图

#### 四、性能卓越：在极稀疏场景中实现颠覆性突破

为了验证SparseFocus的效力，研究团队构建了一个超百万张图像的大规模数据集，涵盖了细胞和组织样本的密集、稀疏、极稀疏三种场景。实验结果表明，新方法实现了全方位领先。

在最具挑战性的极稀疏场景下（如图像中仅有一个小区域包含有效样本），SparseFocus展现出了颠覆性的性能。对于细胞样本，其平均绝对误差低至0.60微米（20倍镜，NA=0.8）；对于组织样本，更是达到了0.45微米。相比之下，以往性能最佳的方法误差高达约10微米，基本宣告对焦失败。这意味着SparseFocus在传统方法完全失效的极端情况下，依然能实现高精度对焦。

此外，在对焦方向预测成功率这一关键指标上，SparseFocus在所有测试场景下的成功率均超过99.8%，展现出极高的稳定性和鲁棒性。消融实验也证实，移除区域重要性网络后，模型在稀疏场景下的性能会急剧下降，凸显了该设计的关键作用。

#### 五、从算法到系统：赋能下一代智能病理成像系统

研究的价值不止于算法创新。团队将SparseFocus集成，开发了一套单曝光对焦增强的全玻片扫描成像系统（Whole Slide Imaging, WSI）。与传统WSI系统需要预先选取大量预对焦点、通过插值生成对焦地图的繁琐流程不同，新系统能够对扫描视野进行实时、快速的一次性对焦，并同步实现扫描及海量图像拼接，在几十秒内实现百亿像素级图像的生成。这不仅将效率提升了一个数量级，更能精准适应样本厚薄不均的表面，生成更清晰、完整的全景数字病理图像，为人工智能辅助诊断提供了更可靠的数据基础。

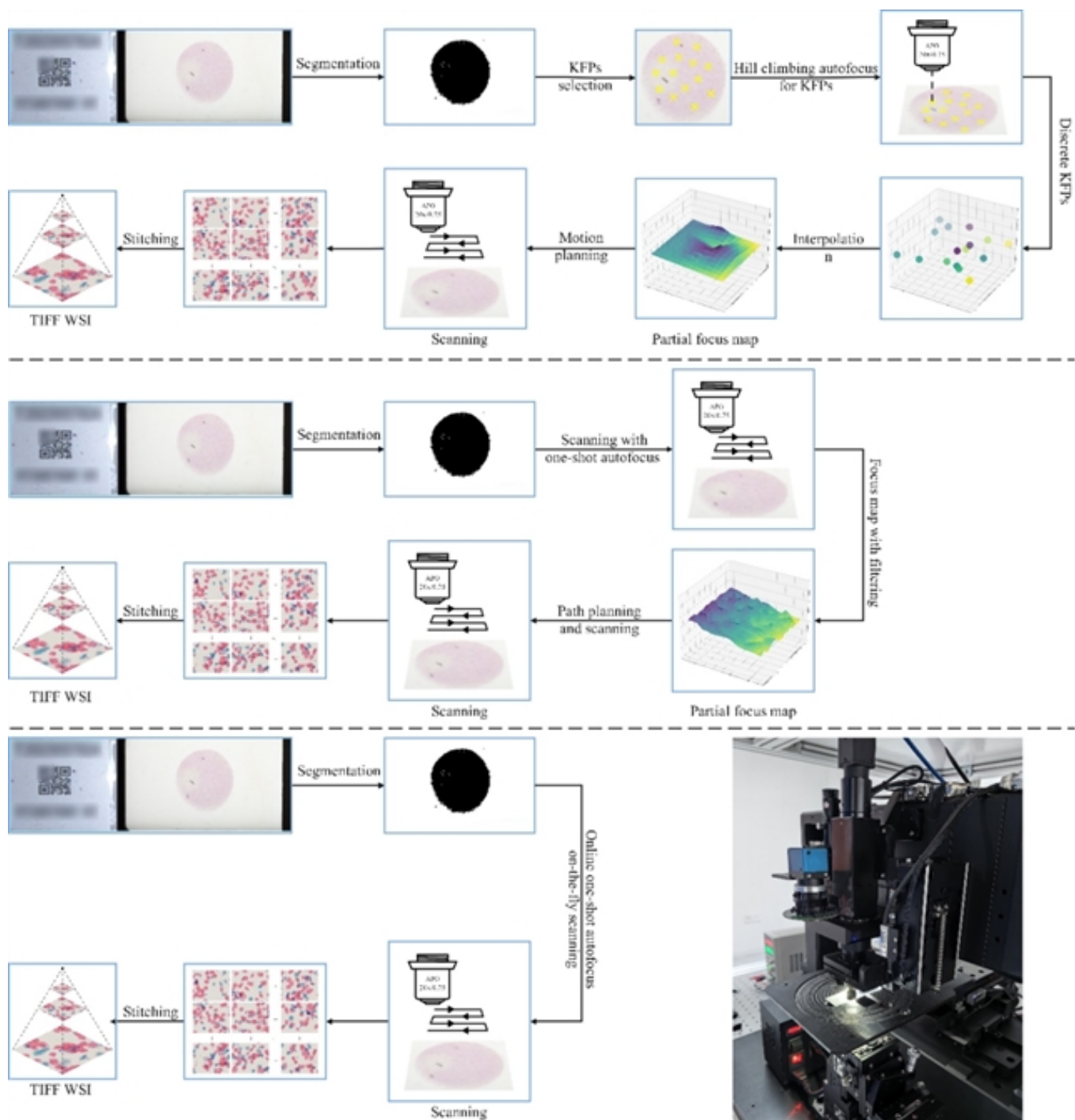


图4：三种WSI扫描方式示意图及系统实物图

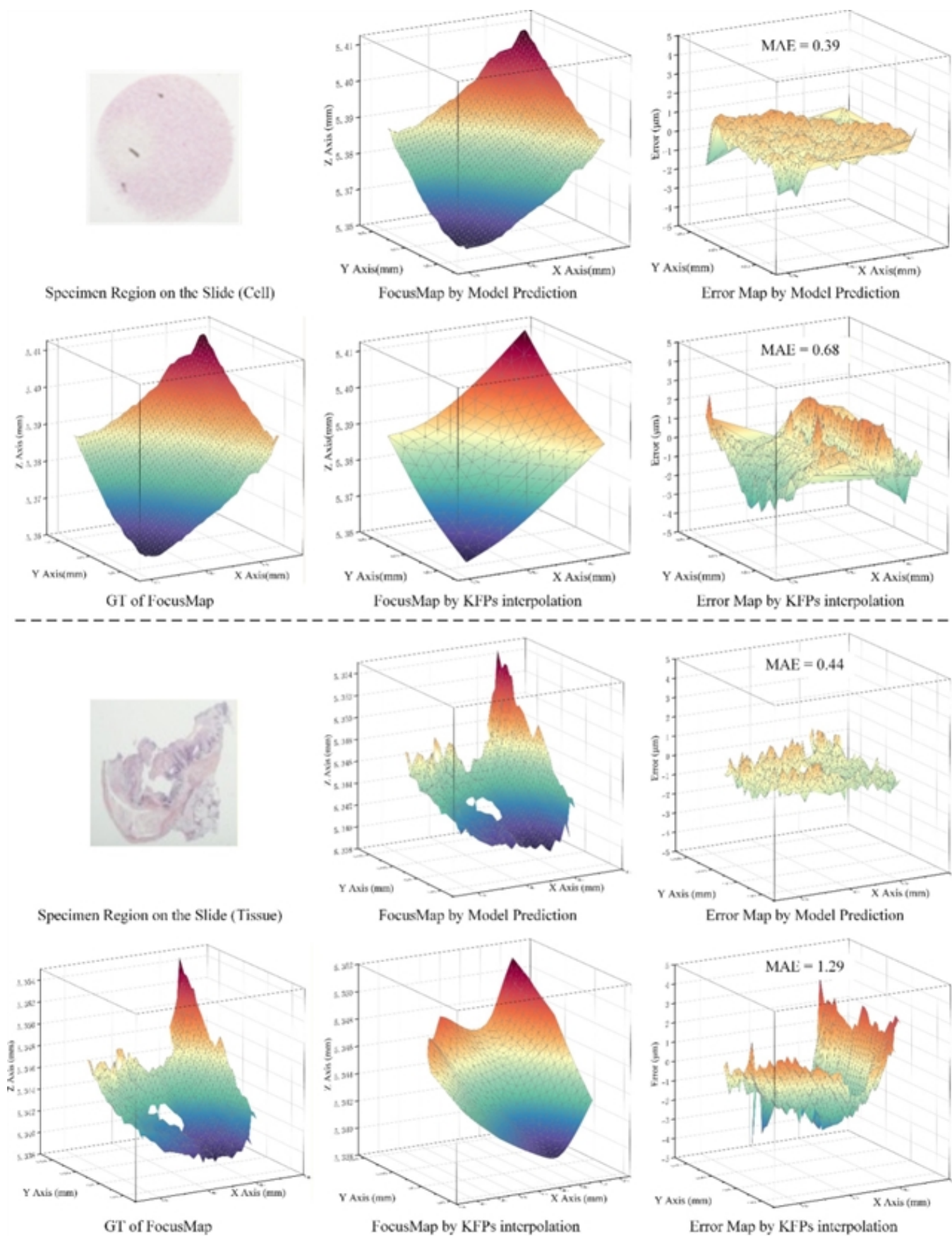


图5：焦点地图及对应误差图

---

## 六、总结与展望

国防科技大学团队的这项工作，通过深入挖掘显微镜系统的内在物理特性（PSF不对称性），并引入内容重要性感知思想，成功攻克了显微镜自动对焦领域长期存在的稀疏内容难题，实现了高速与高可靠的完美结合。SparseFocus不仅是一个高性能算法，更代表了一种物理机理驱动AI设计的新范式。这项研究有望大幅提升高通量显微成像的自动化水平与可靠性，在数字病理、活细胞成像、工业检测等领域具有广阔的应用前景，助力科学研究与精准医疗迈向新台阶。（来源：先进制造微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.37188/lam.2026.009>

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：翟永平等 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