基于渐进薛定谔桥动力学的数字病理高保真无监督虚拟染色

叶剑桥[1,2]，孙嘉鸿[3]，王建东[3]，李欣阳[4]，阎菩提[2]，陈星晔[2]
[1]北京航空航天大学国家卓越工程师学院，中国北京市，100191
[2]北京航空航天大学电子信息工程学院，中国北京市，100191
[3]中国人民解放军总医院普通外科医学部，中国北京市，100853
[4]清华大学人工智能学院，中国北京市，100084

摘要：虚拟染色技术可将无标记自发荧光（AF）图像转化为类苏木精-伊红（H&E）明场对比度图像，实现无损病理检测。本研究将非配对神经薛定谔桥（UNSB）框架应用于自发荧光图像向H&E图像的虚拟染色任务，并构建面向病理图像转换的增强型UNSB（E-UNSB）模型。该框架继承了UNSB非配对、单向、渐进随机传输的建模形式，同时引入病理专属结构正则化约束，以保留细胞形态与组织结构。显著性约束和全局特征一致性提供了多尺度结构引导策略，以缓解染色图像生成过程中的失真。实验结果表明，相较于现有已评估的无监督基准方法，该模型在分布相似性和形态计量一致性方面均有提升。下游定量分析进一步证实，虚拟H&E图像能够保留病理评估所需的形态计量特征，可为高通量多模态组织分析提供支撑。

关键词：虚拟染色；无监督学习；薛定谔桥；数字病理；图像处理
https://doi.org/10.1631/ENG.ITEE.2026.0118