

# 连续光学变焦显微镜的扩展景深三维重建

王君豪<sup>1</sup> 黄天琪<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> (上海交通大学生物医学工程学院, 上海 200240)

**关键词:** 连续变焦成像, 显微摄影, 三维重建

## 1 引言

显微镜是生命科学研究的核心工具, 三维显微成像对理解生物体微结构的形貌有重要价值。然而, 传统的玻璃透镜显微镜由于焦距固定且只能获取二维投影信息, 无法进行深度信息重建; 共聚焦、双光子等技术又存在设备昂贵、重建效率低下的问题<sup>[1-3]</sup>。使用能够连续变焦的液体透镜<sup>[4]</sup>进行显微摄影, 能够实现初步的三维重建, 然而效果不佳<sup>[5]</sup>。本研究提出了一种基于连续变焦液体透镜<sup>[4]</sup>显微成像数据进行扩展景深三维重建的算法, 旨在为研究人员提供快速、低成本的三维显微成像方案。

## 2 方法

基于半透明薄层样本的二维投影重叠特征, 和连续变焦成像的图像清晰度变化序列特征, 我们提出了基于帧间几何特征测度的自动三维重建方案: 1) 用视频时间序列记录平滑变焦的显微数据, 视频分帧处理; 2) 通过相邻帧的相似度与动态阈值进行关键帧检测, 以划分图像栈; 3) 对每个栈内的序列进行三维深度重建。算法支持关键阈值人工微调, 实现深度信息的自动解耦与分层重构。

### 2.1 关键帧检测

使用绝对差异、运动差异和离焦误差三个归一化指标量化差异。令第 $i$ 帧的图像为 $f(x, y, i)$ , 则:

$$\text{abs}_{\text{diff}} = \sqrt{\sum_{c \in \{R, G, B\}} \sum_{(x, y)} k_c |f(x, y, i, c) - f(x, y, i + 1, c)|^2} \quad (1)$$

$$\text{mov}_{\text{diff}} = |m|, m = \text{argmax}_{(a, b)} \mathcal{F}^{-1} \left\{ \frac{F_i^* F_{i+1}}{|F_i^* F_{i+1}|} \right\} \quad (2)$$

$$\text{defcs}_{\text{err}} = \sqrt{\sum_{(x, y)} |f(i + 1) - f(i) * h_R|^2} \quad (3)$$

式(1)中 $k_c$ 是三个颜色分量的权重; 式(2)中 $F_i$ 表示图像的空间-频域傅里叶变换,  $\mathcal{F}^{-1}$ 表示逆傅里叶变换, 该变换的结果为 $\delta(x - a, y - b, i + 1)$ , 其中 $a, b$ 是位

移; 式(3)中 $h_R$ 是高斯函数,  $*$ 表示卷积, 用于表示图像的离焦模糊程度; 由于运动差异与离焦误差会相互影响, 且二者均会对绝对差异造成影响, 为了减少指标的共线性, 额外使用了动态变化的归一化因子 $\alpha, \beta$ ; 综合式(1)-(3), 得到相邻两帧的最终差异为:

$$\text{final}_{\text{diff}} = (1 - \alpha - \beta + 2\alpha\beta) \times \text{abs}_{\text{diff}} + \alpha(1 - \beta) \times \text{mov}_{\text{diff}} + \beta(1 - \alpha) \times \text{defcs}_{\text{err}} \quad (4)$$

### 2.2 三维深度重建

针对栈中图像由模糊到清晰的特性, 我们假设二维投影点唯一对应三维空间点, 改进了 Shape from Focus(SFF)方法<sup>[6]</sup>。通过对比, 选择灵敏度最优的 Sobel 算子计算邻域清晰度, 理论计算表明清晰度关于深度服从高斯分布。将清晰度峰值对应帧的深度作为深度值, 实现逐像素深度信息重建。

## 3 结果

使用水棉显微视频数据集进行方法验证, 实现了良好的三维重建效果, 体现了所提出方法在复杂交叠细胞结构重建的有效性。实验结果显示, 算法实现关键帧检测 100%准确率, 分割出了五个图像栈; 相比传统 SFF 方法, 重建点云完整度提升 3.7 倍, 精度提高 22.6 倍, F1 Score 提高 17.8 倍, 重建效率达 3.6 倍加速。

## 4 结论

本研究提出了一种解决当前快速低成本显微三维成像技术缺口的新方法。实验证明, 所提出的方法在半透明细胞显微三维成像方面存在显著优势, 其高精度、低成本特性为复杂生物样本的三维重建提供了新的解决方案。

## 参考文献

- [1] Reilly W M, Obara C J. Advances in Confocal Microscopy and Selected Applications[M] Brzostowski J, Sohn H, eds. Confocal Microscopy. Methods in Molecular Biology, vol 2304. New York, NY: Humana, 2021: 1-35.

- [2] Dey P. Fluorescence Microscope, Confocal Microscope and Other Advanced Microscopes: Basic Principles and Applications in Pathology[M] Dey P, ed. Basic and Advanced Laboratory Techniques in Histopathology and Cytology. 2nd ed. Singapore: Springer, 2023: 289–301.
- [3] Kučikas V, Werner M P, Schmitz-Rode T, et al. Two-Photon Endoscopy: State of the Art and Perspectives[J]. Molecular Imaging and Biology, 2023, 25(1): 3–17.
- [4] Zhao J, Wang D, Zheng Y, et al. Continuous optical zoom microscopy imaging system based on liquid lenses[J]. Optics Express, 2021, 29(13): 20322–20335.
- [5] Liu C, Jiang Z, Wang X, et al. Continuous optical zoom microscope with extended depth of field and 3D reconstruction[J]. Photonix, 2022, 3(1): 20.
- [6] Nayar S K, Nakagawa Y. Shape from focus[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1994, 16(8): 824–831.