

文章编号: 1000-6281(2020) 01-0040-06

同步辐射荧光分区域面扫描的控制和 图像拼接方法

兰旭颖^{1,2} 张继超^{1,2} 张丽丽^{1,2} 李爱国^{1,2}

(1. 中国科学院上海应用物理研究所 ,上海 201204; 2. 中国科学院上海高等研究院 ,上海 201210)

摘 要 针对同步辐射荧光面扫描实验中 样品荧光信号获取区域大于样品台精细扫描电机的最大行程范围情况下 样品分区域面扫描并完整拼接图像的问题 给出了一种荧光面扫描的控制和图像拼接方法。扫描控制方法实现了获取待拼接荧光图像。图像拼接方法采用尺度不变特征变换算法和快速鲁棒特征算法获取图像特征点并做特征匹配 再用随机采样一致算法进行匹配矫正 由正确匹配对求解出变换矩阵 完成荧光图像拼接。对小鼠的肺进行分区域荧光面扫描实验 其结果表明 所设计的扫描控制方法能有效获取待拼接荧光图像 尺度不变特征变换算法所提取的特征点的正确匹配率能够达到 80% 约为快速鲁棒特征算法的 3 倍 其最终匹配效果满足完整拼接样品荧光图像的要求。

关键词 扫描控制; 荧光图像; 图像拼接

中图分类号: TP399; TH742 文献标识码: A doi: 10. 3969/j. issn. 1000-6281. 2020. 01. 007

同步辐射 X 射线荧光探针是以同步辐射 X 射线源作激发光源获取 X 荧光光谱分析的技术 并在生物、环境、材料科学等领域获得重要应用 特别是需要无损、原位、微区或痕量分析领域^[1-3]。

随着高亮度的第三代同步辐射光源以及先进的 X 射线聚焦光学元件、探测器和计算机等相关技术的发展 同步辐射荧光探针技术的空间分辨率逐渐提高^[4-5] 为科技人员研究微纳米级空间分辨的元素分布提供了强有力的工具^[6-7]。上海光源微聚焦站(BL15U1) 的微米荧光探针最高可实现聚焦光斑 2 μm 并已取得大量的用户成果^[8-10]。上海光源计划在未来提供纳米荧光探针实验条件 实现对样品内元素进行纳米尺度的分布分析。但对于纳米探针 由于实验腔体空间的局限 用于高分辨率精细扫描的样品台尺寸较小 其行程范围水平和垂直方向均为 50 μm ^[11-12] 而实际样品需要扫描的感兴趣区域大于此行程范围的情况下 就无法在样品扫描台行程范围内一次性完成样品扫描 因此必须设计样品分区域荧光面扫描的控制方法 并对获取的各部分荧光图像做拼接处理 以实现样品分区域扫描并拼接获取完整的感兴趣区范围的荧光图像。

针对上述问题 本文设计了一种分区域荧光面扫描的控制方法 以获取样品全部感兴趣区域的待

拼接荧光图像 再分别基于尺度不变特征变换(SIFT) 和快速鲁棒特征(SURF) 算法对待拼接的荧光图像进行图像拼接研究 旨在找到一种能够更好地拼接荧光图像的方法 从而为后续的纳米探针样品分区域荧光面扫描实验中 获取完整荧光图像提供技术支持。

1 荧光面扫描实验装置和控制方法

荧光扫描实验装置布局示意图如图 1 所示。X 射线经过 K-B 镜分别在垂直和水平方向聚焦之后 微米级 X 光束入射到样品上 以激发样品辐射特征 X 射线荧光 单探头硅漂移固体荧光探测器在垂直于光束的方向接收荧光信号 入射光和出射光光强信号分别由前电离室和光电二极管探测。

在样品分区域荧光面扫描实验中 由样品台小行程高分辨率电机经过细扫描获取荧光图像 当小行程电机完成满量程扫描之后 需移动大行程电机做位移补偿 在实际操作中 大行程电机首先沿小行程电机的扫描方向移动 移动量为小行程电机的满量程减去重叠区域(对样品做约 20% ~ 50% 的重叠扫描 为在重叠区域内 有足够大比例的匹配点对是内点 以保证图像拼接的准确性) 然后小行程电机回起始位置 此时样品被定位于重叠扫描的起

收稿日期: 2019-07-08; 修订日期: 2019-08-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 11805258) .

作者简介: 兰旭颖(1986-) ,女(汉族) 辽宁鞍山人 工程师. E-mail: lanxuying@zjlab.org.cn

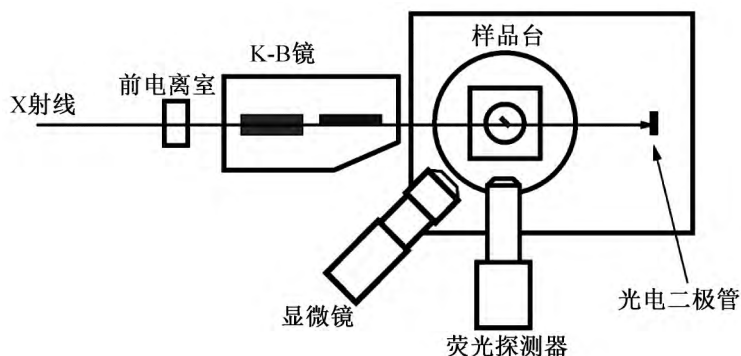


图 1 实验装置布局示意图。

Fig.1 Schematic diagram of experimental devices.

始位置,并再次开始小行程高分辨率电机的细扫描,以获取样品相邻感兴趣区域的荧光图像,重复上述步骤,直到获取样品全部感兴趣区的待拼接荧光图像,该实验方法的扫描控制流程如图 2 所示。

2 荧光图像拼接方法

对荧光图像的拼接是获取样品完整元素分布图像的重要一步。为了尽量减少光强稳定性等对荧光图像的影响,本文首先对待拼接图像进行预处理,然后采用 SIFT 和 SURF 算法分别对待拼接的图像进行特征点提取,用最近距离比次近距离的匹配方法完成图像的特征点匹配,再用随机采样一致 (RANSAC) 方法对匹配点对进行提纯,获取正确的匹配点对,利用此正确匹配点对求解出变换矩阵,并计算投影误差,确定投影变换矩阵的有效性,从而保证拼接结果的准确性,提高图像拼接的质量。

2.1 图像预处理

荧光扫描图像的获取易受单个荧光光子在探测器上产生的电流起伏、光强稳定性等因素的影响,同一样品位置采用相同计数时间,但在不同时刻获取的荧光计数会有不同,导致特征匹配出现误差,因此需要对荧光图像数据进行归一化处理,即将图像的荧光计数值的范围统一化。另外,对于被拼接的图像还需进行格式和尺寸的处理,使被拼接的图像之间没有较大的属性差异。图像预处理为下一步图像的特征匹配做准备。

2.2 图像特征点匹配

SIFT 算法首先是通过不同尺寸的高斯模板进行滤波和降采样形成尺度空间,然后检测该图像尺度空间极值点,去除不稳定的极值点,求出精确关键点后,就可以生成用于匹配的描述向量,利用关键点邻域像素的梯度方向分布特性,为每个关键点计算方向,使描述子对图像旋转具有不变性。图像从 $0^\circ \sim 180^\circ$ 进行旋转变换,特征描述符都具有良好的旋转不变性^[13]。

SURF 算法的总体流程与 SIFT 算法相似,但 SURF 算法在进行特征点的检测时,采用不同大小

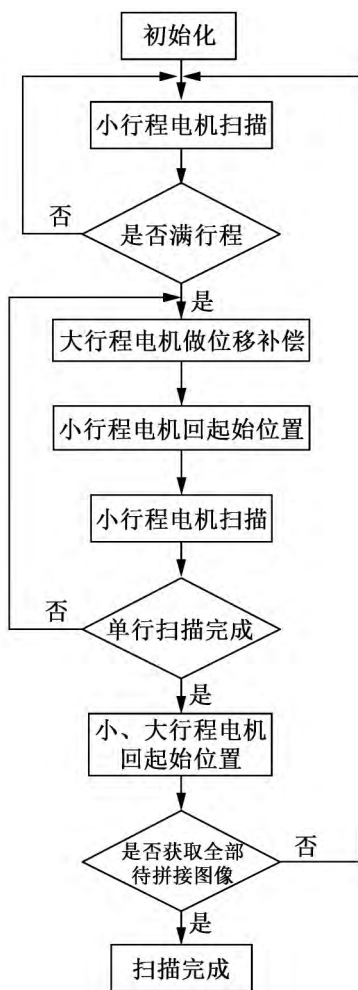


图 2 分区域荧光面扫描的控制流程。

Fig.2 Control process for sub-region fluorescence surface scanning.

的盒子滤波器与原图像做卷积,然后在计算特征点方向时,在特征点的邻接圆形区域内计算 x, y 方向上的 Haar 小波响应并且用积分图像表示描述子。

获取图像特征点后,采用最近距离比次近距离的匹配方法,提取其中的匹配点对。设 P_1, P_2 分别为待拼接图像 1、待拼接图像 2 中任意特征点,则定义 P_1 和 P_2 之间的距离为:

$$D(P_1, P_2) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (Descr_{1i} - Descr_{2i})^2}, \quad (1)$$

其中 $Descr_{1i}, Descr_{2i}$ 是 P_1, P_2 的描述子向量的第 i 个分量。

根据公式(1),将待拼接图像 1 中的某一特征点与待拼接图像 2 中全部特征点的距离进行计算,在图像 2 中找到与图像 1 中特征点距离最近和次近的两点,如果最近距离与次近距离的比值小于某一特定值,则认为图像 1 中的特征点与图像 2 中最近距离的特征点相匹配。

2.3 图像特征匹配对的误差校正

SIFT 和 SURF 算法初匹配后,一般存在明显的错误匹配对。为了消除这些误匹配,采用 RANSAC 算法进行误匹配的剔除^[14-15]。RANSAC 算法剔除误匹配点对,需要计算出待匹配图像之间的坐标转换关系,坐标转换关系即两幅图像之间的变换矩阵。RANSAC 算法剔除错误匹配对的步骤如下:

(1) 设定初始最佳内点数 I 为 0。从 N 对预匹配特征点中随机选取 N_m 点对建立方程组,求解出变换矩阵 M 的 N_m 组未知参数。

(2) 计算其余 $(N-N_m)$ 对特征点经过矩阵 M 的坐标值与预匹配点之间的距离 d 。若 d 小于设定的阈值 T 则定这个预匹配点为内点,反之为外点。

(3) 统计当前变换矩阵内点数目,若数目大于 I ,则当前变换关系 M 为当前最佳变换矩阵估计,同时更新 I ,并将当前内点集中的点对保存为正确的匹配点对。

(4) 另选 N_m 对预匹配点,重复步骤 1~3 若干次后,选择内点最多的变换矩阵,此时内点集中的点对作为正确的匹配点对集合。

RANSAC 算法能在一定误差范围内剔除误匹配点对,为后面进行图像的拼接奠定了基础。

2.4 图像变换矩阵的求解

对图像进行特征点匹配和误差消除的最终目的是拼接不完整的图像。在 RANSAC 算法中,已经由初始点求解的变换矩阵找出了最优的匹配点对,然后利用优化的匹配点对再次求解变换矩阵,并校

验变换矩阵的投影误差,使其能更好地满足投影关系。

给定两幅待拼接图像,假定待拼接的两幅图像上的匹配点坐标 (x_i, y_i) 和 (x_i', y_i') 在同一坐标空间中,那么存在变换矩阵 M 满足:

$$\begin{bmatrix} x_i' \\ y_i' \\ 1 \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_1 & m_2 & m_3 \\ m_4 & m_5 & m_6 \\ m_7 & m_8 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

因此,两幅待拼接图像之间的投影关系为:

$$x_i' = \frac{m_1 x_i + m_2 y_i + m_3}{m_7 x_i + m_8 y_i + 1}, \quad (3)$$

$$y_i' = \frac{m_4 x_i + m_5 y_i + m_6}{m_7 x_i + m_8 y_i + 1}, \quad (4)$$

定义投影误差 $E(M)$ 为^[16]:

$$E(M) = \frac{1}{N_s} \sum_{i=1}^{N_s} \left[\left(\frac{m_1 x_i + m_2 y_i + m_3}{m_7 x_i + m_8 y_i + 1} - x_i' \right)^2 + \left(\frac{m_4 x_i + m_5 y_i + m_6}{m_7 x_i + m_8 y_i + 1} - y_i' \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (5)$$

其中 N_s 为匹配对个数,如果 $E(M) < \varepsilon$,则认为变换矩阵计算正确,可以继续拼接,否则,返回特征提取阶段,重新进行上述操作(其中 ε 为 1 个像素)。

3 实验与结果分析

针对小行程电机扫描大样品范围并获取完整荧光图像的问题,在上海光源 BL15U1 线站,先采用本文所设计的控制方法进行荧光面扫描实验,获取待拼接荧光图像。实验中,入射光能量 10 keV,光斑大小 $10 \mu\text{m} \times 7 \mu\text{m}$,被扫描样品为小鼠的肺。荧光分区域面扫描获取肺中 Fe 元素含量分布的图像,如图 3a 和 3b 所示,分别做为待拼接图像的左侧图和右侧图,两幅图像存在 20%重合的区域。

对获取的上述两幅待拼接图像,采用本文给出的算法对其进行图像拼接实验,实验结果及分析如下。

3.1 特征提取和特征匹配

采用 SIFT 算法对图 3 中待拼接两幅图像特征提取,分别提取了 45 和 45 个特征点,获取特征点匹配对 5 对,如图 4a 所示,可以看到,匹配点对存在误匹配,经 RANSAC 算法剔除误匹配后得到特征点匹配对 4 对,如图 4b 所示。

采用 SURF 算法对图 3 中待拼接两幅图像特征提取,分别提取了 189 和 182 个特征点,获取特征点匹配对 112 对,如图 5a 所示,可以看到,采用该算

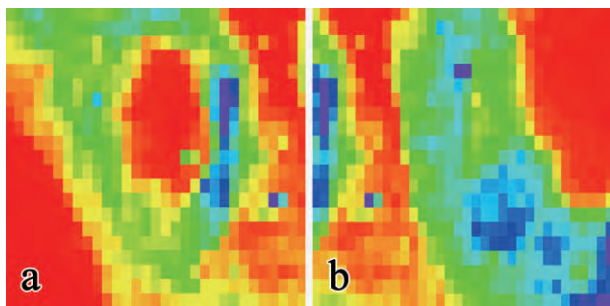


图 3 待拼接图像。a. 左侧图; b. 右侧图。

Fig.3 Images to be stitched. a. Left side image;
b. Right side image.

法, 匹配点对存在较多的误匹配, 经 RANSAC 算法剔除误匹配后得到特征点匹配对 30 对, 如图 5b 所示。

从图 4 和图 5 可看出, 荧光扫描图像特征匹配提纯后较提纯前明显得到优化, RANSAC 算法有效滤除了粗匹配点对集的误匹配点对, 实现了特征精匹配。

3.2 图像拼接

图像拼接是依据正确的匹配点对, 把需拼接的两幅图像通过变换矩阵变换到同一个坐标系内。两种算法的正确匹配率如表 1 所示。

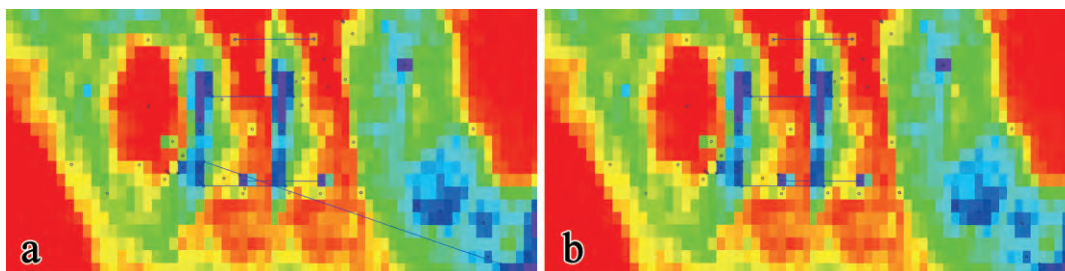


图 4 荧光扫描图像 SIFT 算法特征匹配。a. 特征粗匹配; b. 特征匹配提纯后。

Fig.4 SIFT algorithm feature matching of fluorescent scanning image. a. Feature rough matching;
b. Feature matching after purification.

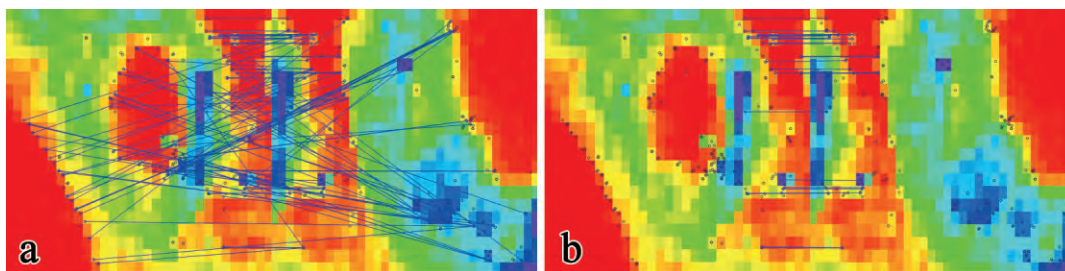


图 5 荧光扫描图像 SURF 算法特征匹配。a. 特征粗匹配; b. 特征匹配提纯后。

Fig.5 SURF algorithm feature matching of fluorescent scanning image. a. Feature rough matching;
b. Feature matching after purification.

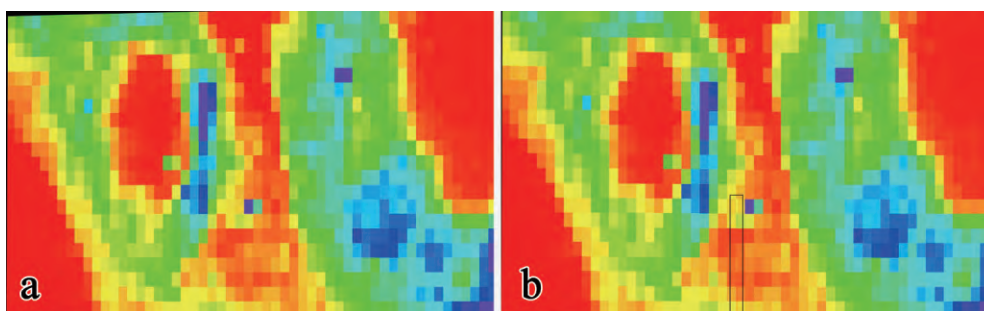


图 6 荧光扫描图像的拼接结果。a. 基于 SIFT+RANSAC 算法; b. 基于 SURF+RANSAC 算法。

Fig.6 Stitching results of fluorescent images. a. Based on SIFT+RANSAC algorithm;
b. Based on SURF+RANSAC algorithm.

表 1 SIFT 算法和 SURF 算法的正确匹配率
Table 1 The correct matching rate between SIFT algorithm and SURF algorithm

算法	运行时间/s	匹配数	RANSAC 后匹配数	正确匹配率/%
SIFT	4.7847	5	4	80
SURF	1.29343	112	30	26.78

由表 1 可知,针对同一幅荧光扫描图像,SURF 算法提取的特征点较多,获取的匹配对也较多,算法速度相对较快,但获取的特征点匹配对正确匹配率低;而 SIFT 算法提取的特征点较 SURF 少,获取的匹配对也较少,但正确的匹配对数较多,正确匹配率(80%)明显高于 SURF 算法。

根据 SIFT+RANSAC 算法和 SURF+RANSAC 算法的匹配点对,分别计算变换矩阵,并对荧光扫描图像进行拼接,两种方法拼接结果如图 6a 和图 6b 所示,可见基于 SIFT+RANSAC 算法的匹配效果能满足完整拼接样品荧光图像的要求,而基于 SURF+RANSAC 算法的匹配效果不太理想,存在部分荧光图像像素点的误匹配,如图 6b 中框内像素点。因此,在荧光分区域面扫描的实验中,荧光图像的拼接采用基于 SIFT+RANSAC 算法的图像拼接方法。

此外,由于基于 SIFT 算法的特征点提取具有尺度不变性,因此用于计算投影矩阵的特征匹配点已经去除了尺度变化的影响,采用文中方法可处理多幅图像拼接。

4 结论

本文对基于同步辐射的荧光面扫描实验中,小行程电机分区域扫描大样品范围的问题进行了研究。利用所设计的荧光面扫描控制方法获取了样品各区域的待拼接荧光图像,对此图像采用 SIFT+RANSAC 和 SURF+RANSAC 算法进行图像特征点提取及匹配,再利用变换矩阵对荧光图像进行图像拼接,并做了实验对比。从实验结果可见,具有高正确匹配率的 SIFT+RANSAC 算法,获得了比较理想的拼接效果,能够满足完整拼接样品荧光图像的要求,证实了所设计方法的可行性,并为后续纳米探针的样品分区域荧光面扫描实验提供技术支持。

参考文献:

[1] CAO Y, MA C, ZHANG J, et al. Accumulation and spatial distribution of copper and nutrients in willow as affected by soil flooding: a synchrotron-based X-ray fluorescence study [J]. *Environmental Pollution*, 2019,

246: 980–989.

- [2] GHOSH M, SWAIN K, DEVI P, et al. Determination of impurities in graphite using synchrotron radiation based X-ray fluorescence spectrometry [J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2017, 128: 210–215.
- [3] HORMES J, DIEKAMP A, KLYSUBUN W, et al. The characterization of historic mortars: a comparison between powder diffraction and synchrotron radiation based X-ray absorption and X-ray fluorescence spectroscopy [J]. *Microchemical Journal*, 2016, 125: 190–195.
- [4] RAUWOLF M, TURYSKAYA A, ROSCHGER A, et al. Synchrotron radiation micro X-ray fluorescence spectroscopy of thin structures in bone samples: comparison of confocal and color X-ray camera setups [J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2017, 24(1): 307–311.
- [5] ALBERT T, HUANG X. Synchrotron X-ray optics [J]. *Annual Review of Materials Research*, 2017, 47: 135–152.
- [6] 凡小盼,赵雄伟,高强. 同步辐射微束 X 射线荧光技术在早期黄铜研究中的应用 [J]. *电子显微学报*, 2014, 33(4): 349–356.
- [7] 杨永兴,包良满,雷前涛. 地铁颗粒物 PM_{2.5} 的 SEM 和微束 XRF 分析 [J]. *电子显微学报*, 2013, 32(1): 47–53.
- [8] ZHANG L, YAN S, JIANG S, et al. Hard X-ray micro-focusing beamline at SSRF [J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2015, 26(6): 060101.
- [9] FU M, ZHOU H, LE Z, et al. Planar PMMA X-ray compound refractive lenses with cascaded parabolic microstructures [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2017, 868: 129–132.
- [10] GAO R, YE X, YAN S, et al. Effects of tungsten content on the high-temperature oxidation behavior of Ni-xW-6Cr alloys [J]. *Corrosion Science*, 2019, 149: 87–99.
- [11] ANSxy100lr/UHV xy-Scanner made from Titanium [EB/OL]. (2019) [2019-5-10]. <https://www.attocube.com/en/products/nanopositioners/ambient-vacuum-nanopositioners/ansxy100lrhuv-xy-scanner-made-titanium>.
- [12] ANSz100lr/UHV z-Scanner made from Titanium [EB/OL]. (2019) [2019-5-10]. <https://www.attocube.com/en/products/nanopositioners/ambient-vacuum-nanopositioners/ansz100lrhuv-z-scanner-made-titanium>.
- [13] 孔韦韦,王炳和,李斌兵,等. 图像融合技术——基于

- 多分辨率非下采样理论与方法 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2015: 7.
- [14] 李丽, 郭双双, 梅树立, 等. 基于特征点提取匹配的蝗虫切片图像的拼接和修复方法 [J]. 农业工程学报, 2015, 31(7): 157-165.
- [15] 翟厚曦, 江泽林, 张鹏飞, 等. 基于图像特征的合成孔径声纳声图像拼接研究 [J]. 网络新媒体技术, 2018, 7(2): 22-28.
- [16] 赵岩, 陈月, 王世刚. 结合投影误差校正的快速 SIFT 图像拼接 [J]. 光学精密工程, 2017, 25(6): 1645-1651.
- [15] 翟厚曦, 江泽林, 张鹏飞, 等. 基于图像特征的合成

The control and image stitching method of synchronous radiation fluorescence sub-region surface scanning

LAN Xu-ying^{1,2}, ZHANG Ji-chao^{1,2}, ZHANG Li-li^{1,2}, LI Ai-guo^{1,2}

(1. Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201204;

2. Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201210, China)

Abstract During the fluorescence probe surface scanning experiment, there is a problem of complete stitching image after the sample sub-region surface scanning when the fluorescence signal acquisition region of the sample is larger than the maximum travel range of the sample stage fine scan motor. To solve this problem, a fluorescence sub-region surface scanning control and image stitching method is given in this paper. The fluorescence surface scanning control method realizes to obtain the fluorescence images to be stitched in each region. The image stitching method adopts scale-invariant feature transform algorithm and speed-up robust features algorithm to acquire image feature points, and then completes the feature point matching. The random sample consensus algorithm is used to perform matching correction for eliminating the mismatch in the matching pair. The transformation matrix is solved from the correct matching pair to complete the stitching of the fluorescent image. The sub-region fluorescence surface scanning experiment was performed on the lungs of mice. The results show that the designed fluorescence surface scanning control method can effectively obtain the fluorescence images to be stitched. The correct matching rate of the feature points extracted by the scale-invariant feature transform algorithm can reach 80%, which is 3 times of the speed-up robust features algorithm. The final matching effect satisfies the requirements of the fluorescence image of completely stitched sample.

Keywords scanning control; fluorescence image; image stitching