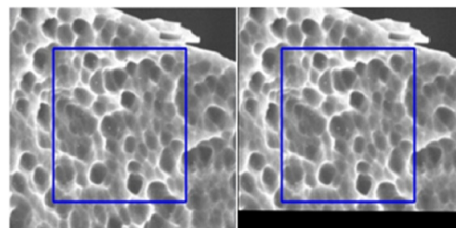




DOI: 10.12086/oe.2018.180198

扫描电子显微镜图像漂移的实时矫正方法

徐伟¹, 谷森¹, 储成智¹, 靳振伟¹, 汝长海^{1,2*}¹苏州大学机器人与微系统研究中心, 江苏 苏州 215021;²苏州纳米科技协同创新中心, 江苏 苏州 215021

摘要: 为解决扫描电子显微镜(SEM)由于电子束漂移、电磁干扰等原因导致的图像漂移问题, 提出基于 ORB 结合 PROSAC 的图像漂移矫正算法。首先采用 ORB 算法对基准图像和实时图像进行特征检测, 然后利用汉明距离与交叉匹配实现特征的初匹配, 再结合 RANSAC 的优化算法 PROSAC 计算帧间的单应矩阵, 利用单应矩阵映射剔除外点后重新迭代计算出最终的精确单应矩阵, 最后利用单应矩阵的透视变换实现 SEM 图像漂移实时矫正。通过实验证明, 该算法不仅精度高, 而且能够满足 SEM 实时处理的要求。

关键词: 扫描电子显微镜; 图像漂移; 单应矩阵; 矫正

中图分类号: O436.3; TP391

文献标志码: A

引用格式: 徐伟, 谷森, 储成智, 等. 扫描电子显微镜图像漂移的实时矫正方法[J]. 光电工程, 2018, 45(12): 180198

Real-time correction of image drift in scanning electron microscope

Xu Wei¹, Gu Sen¹, Chu Chengzhi¹, Jin Zhenwei¹, Ru Changhai^{1,2*}¹Robotics and Microsystems Center of Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215021, China;²Collaborative Innovation Center of Suzhou Nano Science and Technology, Suzhou, Jiangsu 215021, China

Abstract: In order to solve the problem of imaging drift in scanning electron microscope (SEM) that caused by electron beam drift, electromagnetic interference and other reasons, an image shift correction algorithm based on ORB (oriented FAST and rotated BRIEF) combing the PROSAC (progressive sample consensus) is proposed in this paper. Firstly, the ORB algorithm is used to detect the feature between the reference image and real-time image. Then the initial matching of the feature is implemented by using the Hamming distance and cross-matching. Moreover, the RANSAC (random sample consensus) optimization algorithm PROSAC is used to calculate the homography matrix between frames and the final exact homography matrix is re-iterated after eliminating exterior point. Finally, the SEM image drift is corrected in real time using the perspective transformation of the homography matrix. The experiments show that the proposed algorithm is high precision and satisfies the requirement of SEM real-time processing.

Keywords: scanning electron microscopy; imaging drift; homography matrix; correction

Citation: Xu W, Gu S, Chu C Z, *et al.* Real-time correction of image drift in scanning electron microscope[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(12): 180198

收稿日期: 2018-04-17; 收到修改稿日期: 2018-05-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61774107)

作者简介: 徐伟(1994-), 男, 硕士研究生, 主要从事图像处理技术的研究。E-mail: 754464689@qq.com

通信作者: 汝长海(1976-), 男, 博士后, 教授, 主要从事微纳自动化的研究。E-mail: rzh@suda.edu.cn

1 引言

随着纳米科学的发展,新的纳米材料及其卓越性能不断被人们发现和认识,并显示了非常广阔的应用前景^[1]。扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)作为微观形貌观察和显微结构分析的大型分析仪器,已广泛应用于纳米材料尺寸的精确测量、性能表征以及材料的3D形貌恢复。此外,利用SEM图像作为视觉传感器,为自动化纳米操作的发展提供了极大的帮助,如IC芯片的自动检测^[2]、纳米线的自动拾取^[3]以及四探针自动测量纳米线阻抗特性^[4],将人类从繁琐的手动纳米操作中解放出来,极大地提高了工作效率。

SEM需要对样品进行长时间的观察和可调的放大倍数来适用测量的精度。但是SEM的成像过程对时间极其敏感,尤其在高倍率下,由于电子束漂移、电磁干扰以及电子的沉积等原因导致的图像漂移等问题,严重地影响了SEM的测量、表征等功能^[5]。国内外研究人员提出了大量的漂移矫正方法,但仍存在着许多明显的不足:Cizmar等人通过大量采集图像帧,正确对齐后组成单一的图像,但不能够满足SEM实时性的要求^[6]。为了解决实时性的问题,Naresh提出采用ORB结合RANSAC的方法进行矫正^[7],但并未对外点进行剔除,外点的增加会导致RANSAC的抽样次数急剧增长,进而影响算法的效率和测量精度^[8]。虽然原子力显微镜的补偿算法已经能够解决图像漂移的问题,但由于成像原理的不同,导致其方法并不适

用于SEM。

基于现有方法的优缺点,并结合扫描电镜自身成像的特点。本文提出基于ORB(oriented FAST and rotated BRIEF)结合PROSAC(progressive sample consensus)的图像漂移矫正算法。针对RANSAC(random sample consensus)外点过多导致算法效率和测量精度降低等问题,通过利用单应矩阵映射结合欧氏距离的方法对外点剔除后,再次利用RANSAC进行精确单应矩阵的计算;但多次采用RANSAC算法,会导致算法效率的下降。为解决这一问题,本文采用RANSAC的优化算法PROSAC对ORB提取点初始集匹配的结果作为排序的依据,使得在采样时根据匹配结果由高到低的得分进行排序,使得最佳参数的采样较早出现,提高了计算速度,有效地解决了现有SEM图像漂移矫正方法的问题,不仅精度高,而且能够满足SEM实时处理的要求。

2 SEM成像分析

如图1所示,SEM主要由电子枪、聚光镜、扫描线圈、物镜、电子探测器等组成。电子枪发射电子束,经过高压的加速后射向镜筒,并受到第一、第二聚光镜和物镜的汇聚作用,缩小成狭窄的电子束。与此同时,扫描线圈使电子束在样品上作光栅状的扫描,电子束与样品相互作用将产生多种电信号,显像管根据电子探测器收集的电子强度值 $\zeta(r)$ 进行成像^[9]。

理想情况下,强度值 $\zeta(r)$ 仅仅取决于电子束在样

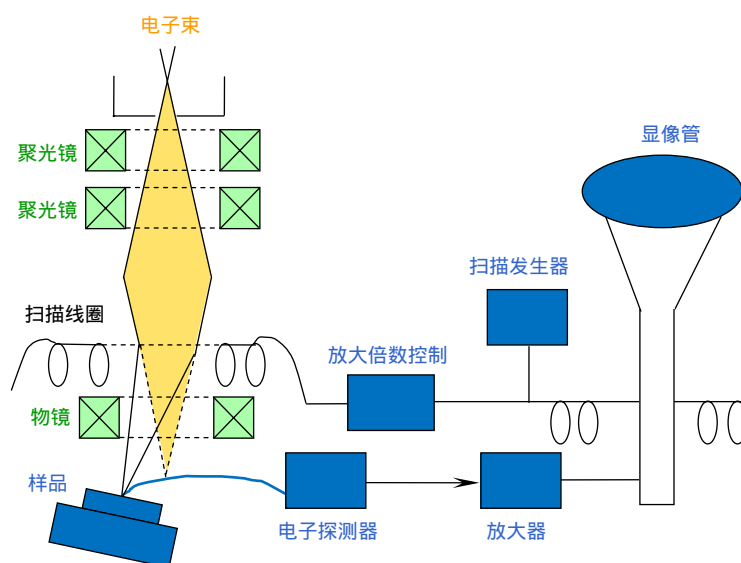


图1 扫描电镜工作原理图

Fig. 1 The working principle of SEM

品上的停留位置 $r_t(t)$ 。但由于 SEM 本身结构的缺陷, 往往引起图像的静态失真和动态失真, 导致图像的实际停留位置 r 为

$$r(t) = r_t(t) + D_d(t) + D_s(r_t) \quad (1)$$

其中:

$$r_t(t) = M(x(t)e_x + y(t)e_y) \quad (2)$$

其中: t 为时间, M 为常数, e_x, e_y 为 x 和 y 方向上的单位向量, D_s 为静态失真, D_d 为动态失真。研究表明: 在低倍率下, 由于观察的样品区域和电子束扫描区域范围比较大, SEM 的成像模型可近似为透视投影模型。此时, 电磁透镜固有缺陷往往引起图像的静态失真, 但随着倍率的不断增加, 静态失真逐渐消失。由于静态失真为常量, 可以通过畸变参数的计算来完成矫正。然而在高倍率下, SEM 的投影中心移动到无限远处, 所以成像模型近似认为是平行投影模型。此时, 静态失真完全消失, 但由电子束漂移、电磁干扰等原因导致图像的动态失真常常引起 SEM 图像进行无规律连续运动(即图像的漂移现象), 如图 2 所示, 红色标记区域随着时间的推移发生了位移, 从而影响 SEM 对纳米材料的测量与表征^[10]。

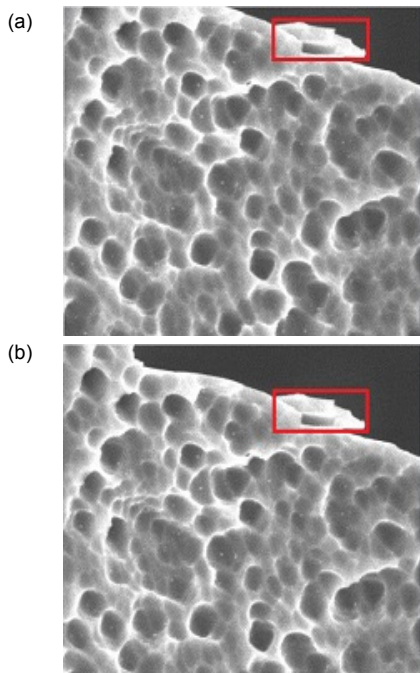


图 2 不同时刻 SEM 图像
Fig. 2 SEM images at different times

3 漂移矫正方法

在图像处理中, 可以通过求取不同图像之间的几何变换来实现图像的对齐。假设 I_0 和 I_t 是 SEM 分别在

t_0 和 t_1 时刻获取的图像, 但是, SEM 图像在 t_1 时刻发生了漂移需要进行漂移补偿。假设 $P_0(x, y) \in I_0, P_1(x', y') \in I_t$ 是分别位于两幅图像上的像素, 则他们之间的运动可以通过单应矩阵 H 进行描述^[11], 即:

$$P_0 \approx HP_1 \quad (3)$$

其中: H 是 3×3 的满秩矩阵, 为

$$H = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & H_{13} \\ H_{21} & H_{22} & H_{23} \\ H_{31} & H_{32} & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

假设 I 为矫正后的图像, 则:

$$I = HP_1 \quad (5)$$

本文利用单应矩阵 H 变换实现了 SEM 图像漂移的快速矫正, 算法流程图如图 3 所示。为了完成特征的初匹配, 首先采用 ORB 算法对基准图和实时图像进行特征检测, 然后计算基准图像帧上某个特征点描述子与实时图像上所有特征描述子之间的汉明距离, 并将所得到的距离进行排序, 取距离最近的作为匹配点, 然后采用交叉匹配剔除误匹配点, 计算实时图像所有特征点的匹配点, 比较与之前的匹配点是否一一对应, 若不对应, 则剔除该匹配对。通过对误匹配对的剔除, 可以提高后续计算单应矩阵 H 的速率。其中汉明距离是描述两个长比特序列 $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 和 $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ 之间的距离计算公式为

$$D(X, Y) = \sum_{k=1}^n x_k \oplus y_k \quad (6)$$

其中: \oplus 表示异或运算, $x_k \in \{0, 1\}, y_k \in \{0, 1\}$ 。

为实现帧间单应矩阵 H 的快速计算, 采用 RANSAC^[11] 的优化算法 PROSAC 计算扫描电镜基准图和实时图之间的单应矩阵 H , 将点初始集 U_n 匹配的结果作为排序的依据, 在采样时根据匹配结果由高到低的得分进行排序, 使得最佳参数的采样较早出现, 提高了计算速度, 算法流程如下^[12]:

- 1) 设定内点数目阈值, 最大迭代次数, 初值设置为 0;
- 2) 按匹配质量将数据排序, 选取前 n 个高质量数据;
- 3) 从 n 个数据中随机去除 m 个, 计算单应矩阵 H 模型参数, 计算符合此模型的内点数目是否大于设定阈值, 若不符合, 迭代次数加 1, 返回 2)。

其中, 如果集合 U_n 中内点数量 I_n 满足 I_n 成为任意错误模型的内点的可能性小于 5% 或者有超过 I_n 个数量的内点在 U_n 中, 且经过 K 次采样没有被发现的可能性小于 5%, 则终止计算最优单应矩阵 H 模型。

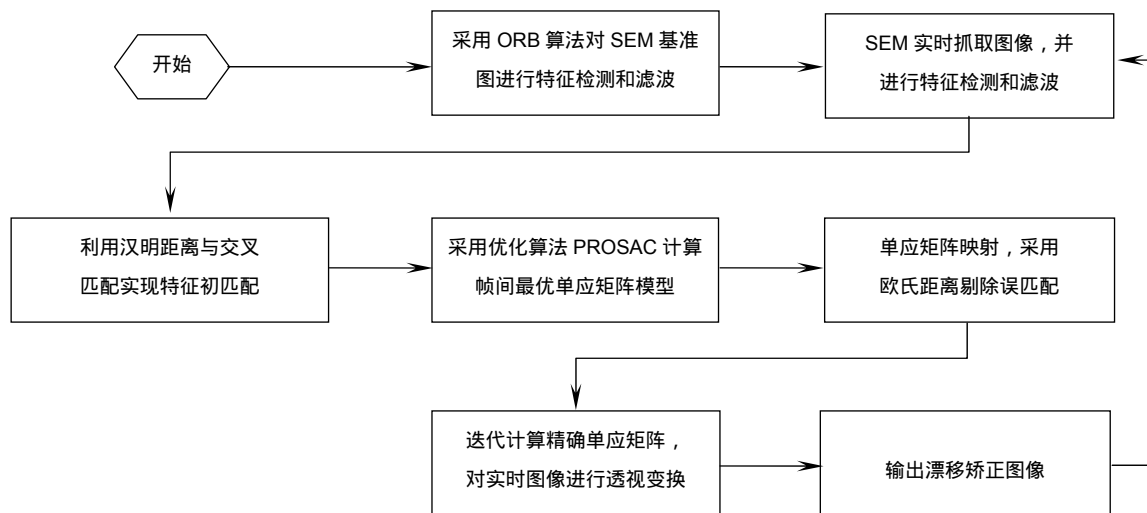


图 3 SEM 图像漂移校正流程图

Fig. 3 The flow chart of SEM image drift correction

4 实验与结果分析

本文采用的操作系统为 Windows 7，实验平台为 Intel(R)Core i5-2450M CPU 2.5 GHz，内存 4 G，环境配置为 VS2010+OpenCV 2.4.13。

为了验证本文算法在扫描电镜图像漂移校正中的有效性与适用性，采用美国 FEI Quanta ESEM 300 与日本 SU8010 扫描电镜分别在 30000×和 35000×下获取黑硅绒面样品图像，所用图像大小均为 512×442。通过 ORB+RANSAC，ORB+D_RANSAC(RANSAC+RANSAC)以及本文算法的处理速度与精度上的对比，得出 SEM 实时漂移补偿的最优算法。图 4(a)、5(a)、6(a)

和 7(a)分别展示 30000×和 35000×扫描电镜的基准图，其中蓝色矩形区域为 SEM 图像的感兴趣(ROI)区域，图 4(b)、5(b)、6(b)和 7(b)为漂移图像，图 4(c)、5(c)、6(c)和 7(c)为本文算法实时校正后的图形，黑色区域为本文算法的漂移补偿区域。表 1~4 为不同电镜在不同放大倍数下计算得到的单应矩阵。其中 H_{11} ， H_{12} ， H_{21} ， H_{22} 表示实时图像的旋转信息，而 H_{13} ， H_{23} 表示图像平移信息。

为了验证校正图像与基准图像的相似度，本文在感兴趣区域(ROI)内对三种校正方法进行平均绝对误差(MAE)计算。MAE 的值越小，表示图像之间的相似度越高，其计算公式如下：

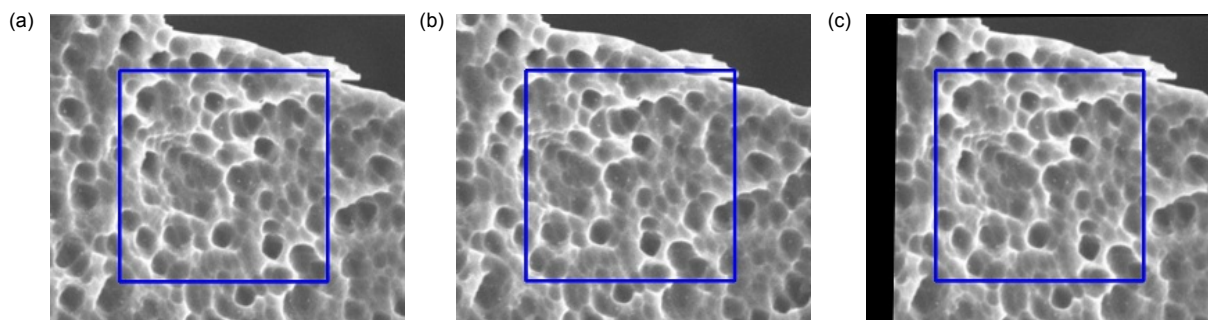


图 4 FEI 在 30000 倍率下漂移校正。(a) 基准图；(b) 实时图；(c) 校正图

Fig. 4 FEI drift correction at 30000× magnification. (a) Reference image; (b) Real-time image; (c) Corrective image

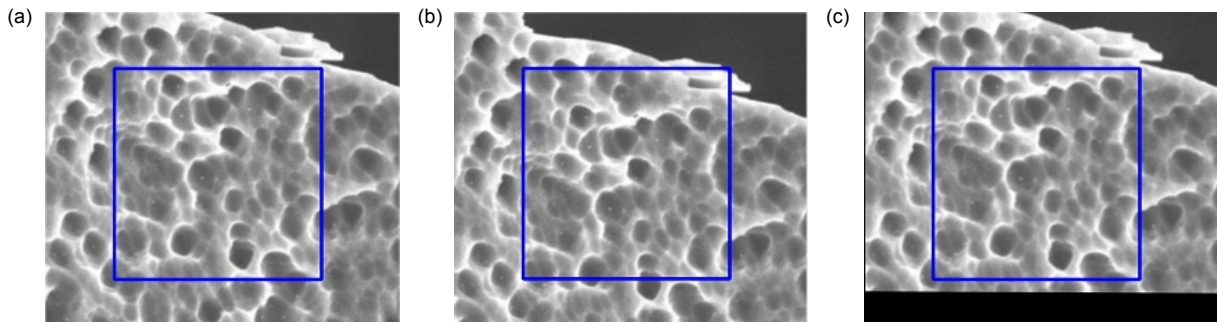


图 5 FEI 在 35000 倍率下漂移矫正。(a) 基准图; (b) 实时图; (c) 矫正图

Fig. 5 FEI drift correction at 35000× magnification. (a) Reference image; (b) Real-time image; (c) Corrective image

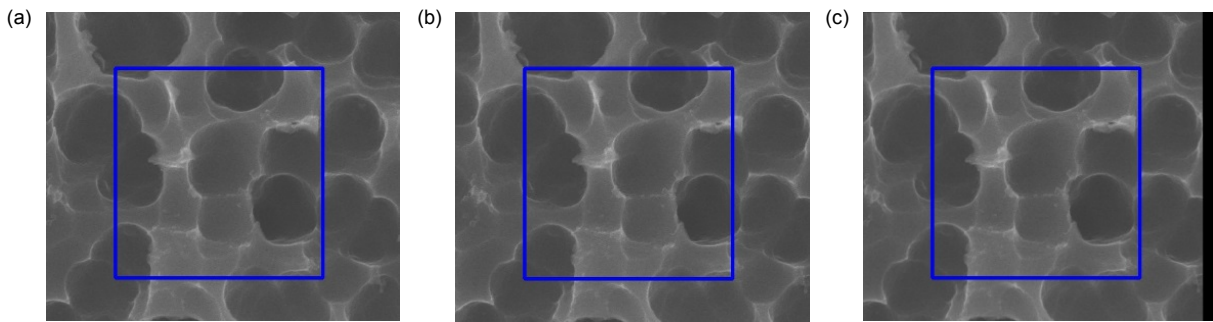


图 6 SU8010 在 30000 倍率下漂移矫正。(a) 基准图; (b) 实时图; (c) 矫正图

Fig. 6 SU8010 drift correction at 30000× magnification. (a) Reference image; (b) Real-time image; (c) Corrective image

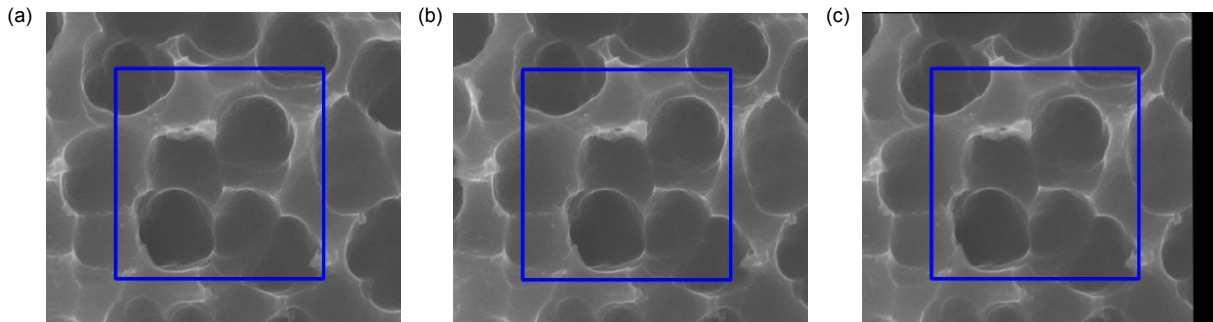


图 7 SU8010 在 35000 倍率下漂移矫正。(a) 基准图; (b) 实时图; (c) 矫正图

Fig. 7 SU8010 drift correction at 35000× magnification. (a) Reference image; (b) Real-time image; (c) Corrective image

表 1 FEI 在 30000 倍率下单应矩阵参数

Table 1 Homography parameters computed at 30000× magnification in FEI

方法	H_{11}	H_{12}	H_{21}	H_{22}	H_{13}	H_{23}
ORB+RANSAC	0.989	0.002	-0.003	0.993	-2.418	-3.269
ORB+D_RANSAC	1.007	-0.002	0.002	1.003	1.574	1.306
本文算法	0.999	-0.001	0.003	1.001	1.478	1.345

表 2 FEI 在 35000 倍率下单应矩阵参数

Table 2 Homography parameters computed at 35000× magnification in FEI

方法	H_{11}	H_{12}	H_{21}	H_{22}	H_{13}	H_{23}
ORB+RANSAC	0.999	-0.002	0.001	0.996	3.937	-1.413
ORB+D_RANSAC	0.999	-0.001	-0.001	0.100	-2.558	2.962
本文算法	0.989	-0.002	-0.001	0.101	-2.345	2.768

表 3 SU8010 在 30000 倍率下单应矩阵参数

Table 3 Homography parameters computed at 30000× magnification in SU8010

方法	H_{11}	H_{12}	H_{21}	H_{22}	H_{13}	H_{23}
ORB+RANSAC	1.001	-0.001	-0.001	0.999	1.187	-4.069
ORB+D_RANSAC	1.000	-0.002	-0.001	1.001	-1.355	-5.768
本文算法	0.999	-0.002	-0.001	1.001	-1.344	-6.023

表 4 SU8010 在 35000 倍率下单应矩阵参数

Table 4 Homography parameters computed at 35000× magnification in SU8010

方法	H_{11}	H_{12}	H_{21}	H_{22}	H_{13}	H_{23}
ORB+RANSAC	0.988	-0.003	-0.003	0.989	-1.446	-1.558
ORB+D_RANSAC	0.994	-0.003	-0.002	0.992	-7.654	-1.369
本文算法	0.993	-0.003	-0.003	0.993	-7.345	-1.568

$$MAE = \frac{1}{MN} \sum_M \sum_N |I_{ROI} - \hat{I}_{ROI}| \quad (7)$$

表 5~8 同时对三种算法的快速性进行了比较。实验结果可得：由于大量外点存在，导致 ORB+RANSAC 算法相比于其他算法的 MAE 偏高，而

ORB+D_RANSAC 为了对外点进行剔除，进行多次迭代，虽然精度有所提高，但在快速性上存在缺陷。本文算法通过对匹配结果由高到低的得分进行排序，对迭代次数进行了优化，在满足 SEM 精度的同时，能够对漂移图像进行实时矫正。

表 5 FEI 漂移矫正平均绝对误差

Table 5 The MAE of FEI drift correction

方法	30000×	35000×
ORB+RANSAC	12.57	20.98
ORB+D_RANSAC	5.47	7.28
本文算法	8.68	13.38

表 6 FEI 漂移矫正帧率

Table 6 The frame rate of FEI drift correction (f/s)

方法	30000×	35000×
ORB+RANSAC	13.38	14.28
ORB+D_RANSAC	11.57	9.54
本文算法	21.80	19.91

表 7 SU8010 漂移矫正平均绝对误差

Table 7 The MAE of SU8010 drift correction

方法	30000×	35000×
ORB+RANSAC	23.97	23.19
ORB+D_RANSAC	19.88	21.89
本文算法	20.95	21.95

表 8 SU8010 漂移矫正帧率

Table 8 The frame rate of SU8010 drift correction (f/s)

方法	30000×	35000×
ORB+RANSAC	14.07	13.45
ORB+D_RANSAC	13.55	12.27
本文算法	21.91	20.47

5 结论

为了解决 SEM 图像由于电子束漂移和电磁干扰等原因导致的图像漂移等问题,本文提出基于 ORB 结合 PROSAC 的图像漂移矫正算法,实验结果表明:相较于其他矫正方法,本文算法在满足 SEM 精度的同时,能够对漂移图像进行实时矫正,并表现出较强的鲁棒性。该方法能够满足不同放大倍数下对 SEM 进行漂移矫正的要求,为 SEM 进行测量、表征等应用提供帮助。

但是,图像配准算法对噪声敏感,在高噪声的环境下容易导致外点的急剧增加,从而影响矫正的精度和实时性。今后将研究如何对 SEM 高噪声图像进行降噪,以进一步提高本文方法的鲁棒性。

参考文献

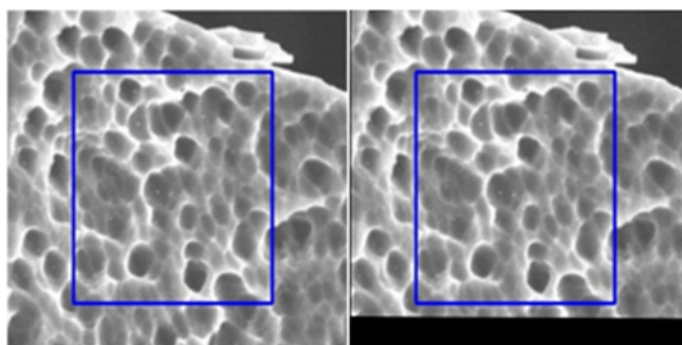
- [1] Cao Y Y, Xie F, Zhang P D, et al. Dual-beam super-resolution direct laser writing nanofabrication technology[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, **44**(12): 1135–1145.
曹耀宇, 谢飞, 张鹏达, 等. 双光束超分辨激光直写纳米加工技术[J]. *光电工程*, 2017, **44**(12): 1135–1145.
- [2] Gong Z, Chen B K, Sun Y, et al. Robotic Probing of Nanostructures inside Scanning Electron Microscopy[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2014, **30**(3): 758–765.
- [3] Ye X T, Zhang Y, Ru C H, et al. Automated Pick-Place of Silicon Nanowires[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2013, **10**(3): 554–561.
- [4] Ru C H, Zhang Y, Sun Y, et al. Automated Four-Point probe Measurement of Nanowires Inside a Scanning Electron Microscope[J]. *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 2011, **10**(4): 674–681.
- [5] Gong Z, Chen B K, Sun Y, et al. Fluorescence and SEM correlative microscopy for nanomanipulation of subcellular structures[J]. *Light: Science and Application*, 2014, **3**(11): e224.
- [6] Cizmar P, Vladar A E, Postek M T. Real-Time Scanning Charged-Particle Microscope Image Composition with Correction of Drift[J]. *Microscopy and Microanalysis*, 2011, **17**(2): 302–308.
- [7] Marturi N, Demele S, Piat N. Fast Image Drift Compensation in Scanning Electron Microscope using Image Registration[C]// *Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering*, 2013: 807–812.
- [8] Xiao C B, Feng D Z, Feng X W. Fast RANSAC algorithm with resample optimization[J]. *Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics*, 2016, **28**(4): 607–613.
肖春宝, 冯大政, 冯祥卫. 重抽样优化的快速随机抽样一致性算法[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2016, **28**(4): 607–613.
- [9] Sutton M A, Li N, Li X D. Metrology in a scanning electron microscope: theoretical developments and experimental validation[J]. *Measurement Science and Technology*, 2006, **17**(10): 2613–2622.
- [10] Malti A C, Dembele S, Piat N, et al. Magnification-continuous static calibration model of a scanning- electron microscope[J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2012, **21**(3): 033020.
- [11] Marturi N. Vision and visual servoing for nanomanipulation and nanocharacterization in scanning electron microscope[D]. France: Univerite De France-comte, 2013.
- [12] Liu W, Zhao W J, Li C, et al. Detecting small moving target based on the improved ORB feature matching[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2015, **42**(10): 13–20.
刘威, 赵文杰, 李成, 等. 基于改进 ORB 特征匹配的运动小目标检测[J]. *光电工程*, 2015, **42**(10): 13–20.

Real-time correction of image drift in scanning electron microscope

Xu Wei¹, Gu Sen¹, Chu Chengzhi¹, Jin Zhenwei¹, Ru Changhai^{1,2*}

¹Robotics and Microsystems Center of Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215021, China;

²Collaborative Innovation Center of Suzhou Nano Science and Technology, Suzhou, Jiangsu 215021, China



The correction of image drift in SEM

Overview: With the development of nanoscience, new nanomaterials and their excellent properties have been continuously discovered and recognized, showing a broad application prospect. Compared with the traditional optical microscope, the scanning electron microscope (SEM) has been widely used in the characterization of nanomaterials, micro deformation measurement with the advantages of its simple preparation, wide range of adjustable magnification, high resolution and great depth of field. In addition, the use of SEM images as visual sensors has merit in the development of automated nanomanipulations, such as automatic detection of IC chips, automatic pick-up of nanowires, and automatic measurement of nanowire impedance characteristics by four-point probes, making humans liberated from tedious nano-manipulations, greatly improving work efficiency. However, the drift of images caused by electron beam drift and electromagnetic interference at high magnification will affect the size measurement and characterization of nanomaterials in SEM.

At present, domestic and foreign scholars have actively studied the correction method of SEM image drift, but there are still many obvious shortcomings. Cizmar et al. aligned the images correctly to form a single image by using large numbers of image frames, but which can't meet the requirements of the real-time in SEM. In order to solve the problem of real time, Naresh took the ORB combining the RANSAC to correct the drift image, but it does not eliminate the external points. The increase of the external points lead to the rapid increase of the sampling times of RANSAC, and then affects the efficiency of the algorithm and the accuracy of the measurement. Although AFM compensation algorithm has been able to solve the problem of image drift, it is not suitable for SEM because of the different principles. An image shift correction algorithm based on ORB (oriented FAST and rotated BRIEF) combining the PROSAC (progressive sample consensus) is proposed in this paper. Firstly, the ORB algorithm is used to detect the feature between the reference image and real-time image. Then the initial matching of the feature is implemented by using the Hamming distance and cross-matching. Moreover, the RANSAC (random sample consensus) optimization algorithm PROSAC is used to calculate the homography matrix between frames and the final exact homography matrix is re-iterated after eliminating exterior point. Finally, the SEM image drift is corrected in real time using the perspective transformation of the homography matrix. The experiments show that the proposed algorithm is high precision and satisfies the requirement of SEM real-time processing. This method can meet the requirements of the drift correction in SEM under different magnifications, and provide help for SEM measurement, characterization and other applications.

Citation: Xu W, Gu S, Chu C Z, et al. Real-time correction of image drift in scanning electron microscope[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(12): 180198

Supported by National Natural Science Foundation of China (61774107)

* E-mail: rzh@suda.edu.cn