

文章编号: 2095-4980(2021)06-1070-05

基于重叠分类和腐蚀速率的重叠径迹分离方法

张劲峰

(西南科技大学 计算机科学与技术学院, 四川 绵阳 621010)

摘要: 粒子径迹的严重重叠粘连会影响粒子径迹的测量精确度。提出一种基于径迹重叠分类的严重粘连重叠核径迹分离测量新方法。首先, 按照重叠粒子径迹中心的相互包含性, 对重叠粘连的粒子径迹进行分类, 以辨别粒子粘连的严重程度; 然后, 以等比缩小一半的非粘连重叠的粒子径迹图像为结构元素, 对粘连重叠粒子径迹显微图像进行有限次腐蚀操作, 有效分离了严重粘连重叠的粒子径迹, 形成了四类径迹分类图像。实验结果表明, 结合新的分类方法和有限腐蚀能够分割严重粘连重叠的径迹图像, 消除径迹重叠粘连对图像测量精确度的影响。

关键词: 有限腐蚀; 重叠粒子径迹; 结构元素; 图像匹配; 多尺度

中图分类号: TP317.4

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2019352

Separating method of overlapping track based on overlapping classification and erosion rate

ZHANG Jinfeng

(College of Computer Science & Technology, Southwest University of Science & Technology, Mianyang Sichuan 621010, China)

Abstract: The severe overlapping of particle tracks seriously affects the measurement accuracy of particle track. A new method is proposed based on track overlapping classification to separate and measure the severe overlapping of particle tracks. Firstly, the overlapped tracks are classified according to the inclusion of particle track centers to identify the severity of particle overlapping. Then, the non-overlapping particles are scaled to half to form structural units. The finite erosion operations are applied to the severely overlapped particle tracks based on these structural elements. These particle tracks are separated, and form four kinds of track classification images. Experimental results show that these severely overlapped particle tracks can be separated by combining track overlapping classification and finite erosion operations, which can eliminate the influence of track overlapping on the image measurement accuracy.

Keywords: finite erosion; overlapped particle tracks; structural elements; image matching; multi-scale

固体核径迹探测器是一种能够探测带电粒子等辐射粒子参数的探测器, 在航天和环境探测等领域得到广泛应用。其原理是: 径迹探测材料被带电粒子辐射损伤后, 经过蚀刻剂腐蚀, 沿辐射损伤路径出现孔洞, 形成径迹。在径迹图像中, 大量的径迹重叠粘连在一起。分离和识别重叠粘连的径迹, 是测量粒子参数的关键技术。在粒子径迹比较密集的测量场景中, 粒子径迹的测量精确度依赖于重叠粘连径迹的分离效果^[1]。

粒子径迹重叠粘连分离问题是粒子径迹图像测量的重点研究方向。为了分离重叠粘连的径迹, 学者们采取了各种图像处理技术。有学者参考细胞识别分离技术提出分离粒子径迹的方法^[2]。还有学者根据粒子径迹近似圆形或椭圆形的特点, 提出利用图像轮廓拟合的图像处理办法^[3-4], 如使用 Hough 变换检测拟合圆形径迹轮廓, 完成粘连目标分离的方法, 或采用椭圆拟合重叠径迹的边界识别径迹的方法等。也有学者采用形态学中的分水岭算法, 通过识别重叠粘连径迹的边界凹点, 然后进行凹点配对的方法实现粘连目标的分离^[5]。还有学者使用水平集的方法来处理粘连径迹, 采用 Canny 算子进行边缘检测, 提取可能的径迹对象^[6]。有学者基于连续

收稿日期: 2019-09-19; 修回日期: 2020-05-14

基金项目: 西南科技大学自然科学基金资助项目(基于立体视觉的固体核径迹图像测量方法研究 18ZX7106)

腐蚀在医学图像重叠粘连细胞的良好处理效果，使用连续腐蚀将粘连粒子径迹分离后重建径迹轮廓。或将极限腐蚀和距离变换结合起来，寻找重叠径迹的分离点，也可完成粘连目标的分离^[7-8]。

这些径迹图像处理方法适用于一部分径迹重叠、粘连少的情况，但对大部分的重叠粘连都难以做到准确分离。究其原因，主要是这些方法采用同一种方法处理重叠严重程度不同的重叠粘连径迹，导致严重重叠粘连粒子的分离效果较差。

1 基于重叠分类的严重重叠粒子径迹分离和分类方法

1.1 粒子径迹图像的产生及特点

随着高能粒子以不同的速度和角度入射到探测器，探测器上粒子径迹的形状和面积也会产生相应的变化，粒子径迹表面形状的轮廓近似为圆形或椭圆形。测量时，将探测器放置在二维运动平台上进行扫描，形成多个区域的径迹图像后，将这些径迹图像拼接起来形成完整的径迹图像。

大部分径迹图像呈现中心带孔洞的近似圆形或椭圆形。虽然数量比较大，但粒子径迹种类比较少。粒子径迹不仅存在单个粒子的径迹，也有大量的径迹重叠粘连在一起，有的径迹重叠粘连非常严重。

1.2 径迹重叠严重程度分类方法

根据径迹图像的特点和各种分离方法的效果，径迹重叠的严重程度分类方法是：以重叠粒子径迹中心位置的相互包含性，对粒子径迹重叠粘连的严重程度进行分类。径迹重叠粘连的模型如图 1 所示。以圆作为粒子径迹的模拟形状。其中， B_1 和 B_2 表示重叠粘连在一起的粒子径迹， O_1 和 O_2 分别表示 B_1 和 B_2 粒子径迹的中心。图 1(a)表示重叠较少的径迹，特征是中心 O_1 处于径迹 B_2 的轮廓外，中心 O_2 处于径迹 B_1 的轮廓外；图 1(b)表示重叠严重的径迹，特征是中心 O_1 处于径迹 B_2 的轮廓内部。中心 O_1 和中心 O_2 距离越近，表示径迹重叠程度越严重。

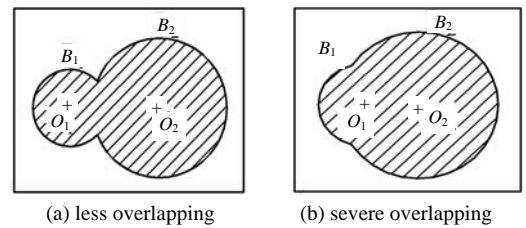


Fig.1 Track overlapping model

图 1 径迹重叠粘连模型

径迹重叠粘连程度较严重的情况下，如果对径迹图像使用形态学腐蚀中常用的比较小的结构元素进行极限腐蚀时，容易造成小径迹湮没的现象，分离严重重叠的径迹十分困难。

1.3 基于重叠严重程度分类的重叠径迹的腐蚀分离方法

粒子径迹的识别分类是以粒子径迹的形状和面积来判别的。本文中，以各类粒子径迹作为模板，将已经识别的单个粒子径迹等比缩小后设计为结构元素，对重叠粘连粒子径迹进行多次腐蚀。根据目标图像与腐蚀结构元素两者形状和面积的重合度，来检测两者的形状及面积的匹配程度。按照径迹重叠严重程度对重叠径迹分类，分别设计腐蚀分离方法。

1.3.1 重叠程度较少的径迹图像分离方法

还是以圆作为粒子径迹的模拟形状，讨论重叠程度较少的径迹图像分离方法如图 2 所示。重叠较少的径迹模型如图 2(a)所示。设计一个极限腐蚀中使用的小的结构元素 E_3 。设计和径迹圆 B_1 面积相当的结构元素 E_1 ，和径迹圆 B_2 面积相当的结构元素 E_2 。

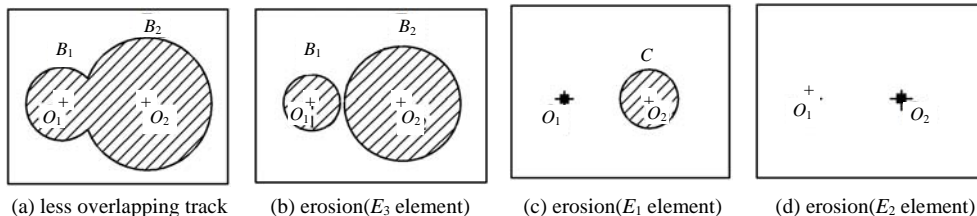


Fig.2 Less overlapping track model and erosion results

图 2 重叠粘连较少的径迹模型及腐蚀结果

分别使用这 3 个结构元素对重叠较少的径迹图 2(a)进行腐蚀，结果如图 2(b),2(c)和 2(d)所示。其中，斜线区域表示径迹连续存在，中心方块表示保留的单个径迹。

在图 2(b)中，使用小的结构元素 E_3 腐蚀重叠径迹时，腐蚀后两个粒子径迹同时存在，说明有效分离了重叠较少的粒子径迹。

在图 2(c)中, 使用和径迹圆 B_1 面积相当的结构元素 E_1 腐蚀重叠径迹。腐蚀后在中心 O_1 保留单个径迹图像, 如中心方块所示。在中心 O_2 保留连续径迹图像, 如图 2(c)所示。两个粒子径迹也会同时存在, 说明有效分离了重叠较少的粒子径迹。

在图 2(d)中, 使用和径迹圆 B_2 面积相当的结构元素 E_2 腐蚀重叠径迹。腐蚀后在中心 O_2 保留单个径迹图像形心, 如中心方块所示。在中心 O_1 没有留下径迹。说明使用大尺度结构元素腐蚀重叠径迹时, 会将小的径迹腐蚀掉, 不会留下小径迹。这个结果可用来分类径迹, 形成分类的径迹图像。

以上研究结果表明, 重叠较少的径迹如果使用较小的径迹作为腐蚀结构元素, 重叠径迹在腐蚀后, 会被分离成不重叠的径迹, 粒子径迹得到有效的分离。如果采用大的径迹作为腐蚀结构元素, 可以有效消除小的径迹, 有利于形成径迹的分类图像。

1.3.2 重叠程度较严重的径迹图像分离方法

重叠严重的径迹图像分离方法如图 3 所示。重叠严重的径迹模型如图 3(a)所示。设计和圆 B_1 面积相当的结构元素 E_1 , 和 B_2 面积相当的结构元素 E_2 。分别使用这两个结构元素作用到重叠较严重的径迹图 3(a)上, 腐蚀结果分别如图 3(b)和图 3(c)所示。其中, 斜线区域表示径迹连续存在, 中心方块表示保留的单个径迹。

在图 3(b)中, 使用和小圆 B_1 面积相当的结构元素 E_1 腐蚀重叠径迹时, 腐蚀后在中心 O_1 与中心 O_2 间形成连续径迹, 如斜线覆盖部分所示。继续腐蚀就会造成中心 O_1 被腐蚀掉, 则圆 B_1 的径迹在分离前已经被湮没了, 没有达到腐蚀分离重叠径迹的目的。

在图 3(c)中, 使用和大圆 B_2 面积相当的结构元素 E_2 腐蚀重叠径迹时, 腐蚀后在中心 O_2 保留单个径迹图像形心, 如中心方块所示。在中心 O_1 没有留下单个径迹形心。说明使用大尺度结构元素腐蚀重叠径迹时, 会将小的径迹腐蚀掉, 不会留下小径迹。这一结论和重叠较小的径迹图像分离结果一致。

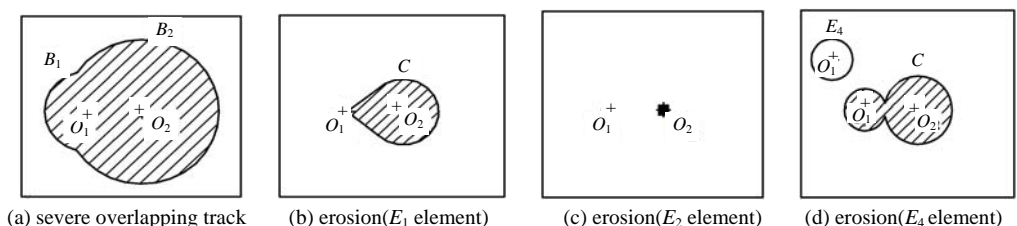


Fig.3 Severe overlapping track model and erosion results
图 3 重叠粘连较严重的径迹模型及腐蚀结果

1.3.3 重叠径迹分离的多尺度原理

设重叠径迹中相邻径迹腐蚀变化速度比为 V_R , 如式(1)所示:

$$V_R = \frac{R_A - R_E}{R_B - R_E} \quad (1)$$

式中: R_A 表示大径迹的半径; R_B 表示小径迹的半径。在重叠径迹测量中, R_A 和 R_B 都是常量。 R_E 表示腐蚀结构元素的半径, 设计为变量。当 R_E 变化时, V_R 的变化显示不同尺度的结构元素对大的径迹和小的径迹的腐蚀相对速度的影响, 直观地表达腐蚀结构元素对大小径迹的不同腐蚀效果。 R_A 和 R_B 取不同值时, V_R 曲线如图 4 所示。

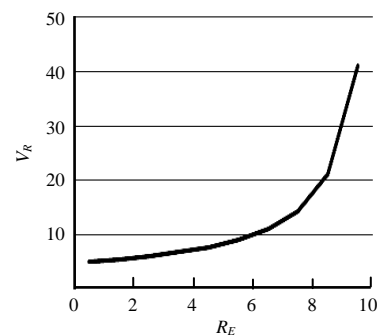


Fig.4 V_R curve($R_A=50, R_B=10$)
图 4 V_R 曲线图

由 V_R 曲线可以看到, 在小的结构元素腐蚀作用下, 大的径迹和小的径迹的曲率变化速度相差较小, 有利于分离重叠较小的径迹。而在大的结构元素腐蚀作用下, 大的径迹和小的径迹的曲率变化相差较大, 大的径迹的曲率变化速度更大, 有利于分离重叠较严重的径迹。

根据 V_R 曲线采用不同尺度的目标模板元素, 腐蚀径迹图像后会产生不同结果。经过多次实验后发现, 采用缩小一半的粒子径迹作为腐蚀模板, 腐蚀严重重叠粒子径迹, 重叠的径迹图像得到有效分离, 如图 3(d)所示。结构元素 E_4 只有结构元素 E_1 一半大小。当重叠粘连程度较多的径迹图像模型使用结构元素 E_4 进行腐蚀后, 圆 B_2 变成圆 C 。圆 B_1 中心 O_1 从圆 B_2 的径迹内部变成位于圆 C 的外部, 重叠粘连程度较严重的径迹图像变为重叠粘连程度较少的径迹图像。再次腐蚀, 重叠径迹将得到有效分离, 重叠径迹分离效果和效率都较高。

1.4 基于重叠分类的严重重叠粒子径迹分离和测量方法

重叠的粒子径迹图像分离和分类识别问题可以视为带遮挡的目标图像识别问题。合理的图像分割步骤能

够反映目标本质的形状特征和目标分类标准，能够适应多种阈值的自适应聚类方法等图像分类识别算法，决定图像识别的效果^[9]。

基于径迹重叠分类的重叠粒子径迹分离方法是：图像通过预处理和图像分割后，提取容易识别没有重叠的粒子径迹，对这些粒子径迹分类；然后，将分类后的粒子径迹作为图像匹配的模板图像，进行尺度变换，以等比缩小一半的径迹图像为腐蚀结构元素，对严重重叠粒子径迹显微图像进行有限腐蚀操作，消除径迹图像的重叠异常。

粒子径迹主要由径迹的形状和面积来确定粒子的种类，粒子径迹图像匹配中的形状特征主要选择面积和形状因子等几何特征。粒子径迹的面积是统计径迹内部的像素的总数目，以 S 表示径迹的面积， C 为粒子径迹周长。径迹的形状因子 PE 定义如式(2)所示：

$$PE = \frac{4\pi S}{C^2} \quad (2)$$

粒子径迹的面积 S 设置阈值 T_S ，形状因子 PE 设置阈值 T_E 。分类标准如式(3)所示：

$$\begin{cases} S_1 - S_2 < T_S \\ E_1 - E_2 < T_E \end{cases} \quad (3)$$

基于重叠分类和有限腐蚀的严重重叠粒子径迹测量算法流程如图 5 所示。

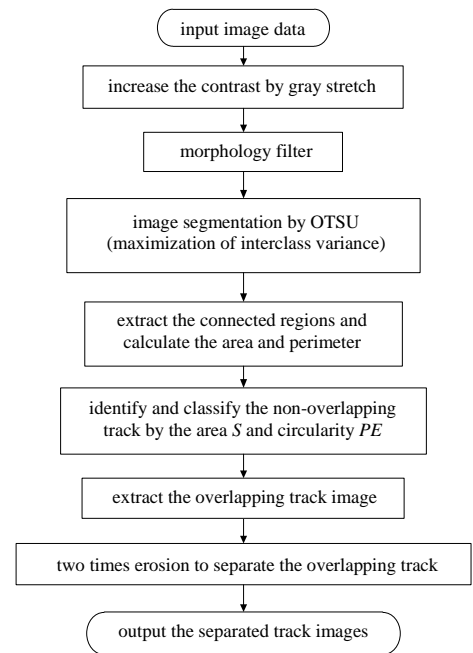


Fig.5 Flow of overlapping track image measurement
图 5 重叠粒子径迹图像测量流程图

2 实验结果分析

粒子径迹图像处理实验结果如图 6 所示。图 6(a)是需要被处理测量的原始径迹图像。采用灰度分段拉伸、最大类间方差法进行阈值分割，反色变换结果如图 6(b)所示。应用径迹的形状因子和面积特征作为判断标准，得到未重叠径迹如图 6(c)所示。只包含重叠粘连径迹的图像如图 6(d)所示。以未重叠径迹按比例缩小一半，分别作为结构元素，对图 6(d)重叠粘连径迹进行有限腐蚀，得到分类图像如图 6(e),(f),(g),(h)所示。

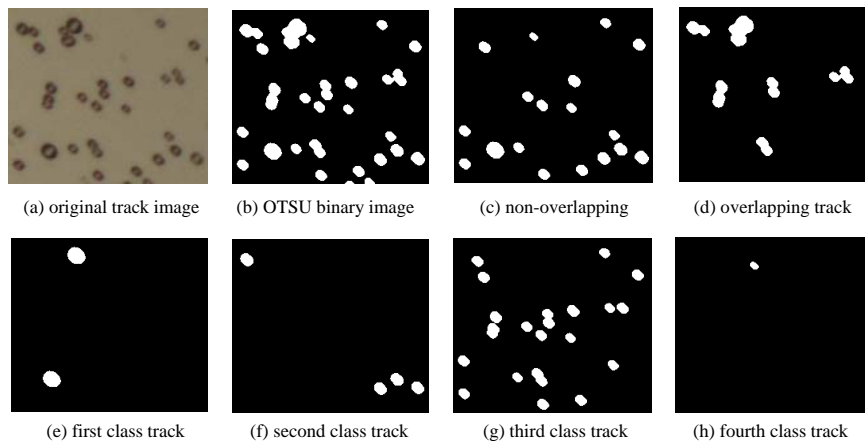


Fig.6 Processing results of overlapped track images
图 6 重叠粒子径迹图像处理结果

表 1 是粒子径迹图像测量结果。粒子径迹分为 4 类，对每个类别的粒子总数、重叠径迹数量以及严重重叠粒子数量分别进行分类。实验中，获得的分类图像中粒子的面积大小依次减少，粒子径迹面积和形状近似，与人工观察结果一致。

表1 粒子径迹图像测量结果

Table1 Results of track image measurement				
index	first class track	second class track	third class track	fourth class track
total number of particles	2	4	23	1
number of overlapping particles	1	1	9	1
number of severe overlapping particles	1	1	4	1

3 结论

在粒子径迹测量中,径迹重叠粘连严重影响了径迹参数测量的准确性。通过将粒子径迹分为较少重叠的径迹和严重重叠的径迹,利用形状匹配和多次腐蚀,以单个粒子径迹作为模板构造腐蚀结构元素,基于不同尺寸的粒子径迹腐蚀速率的不同,较好地完成了重叠径迹的分离和分类。不管是单个的、重叠较少或是严重重叠粘连粒子径迹,都得到了有效的提取分类。该方法可以应用于重叠目标的识别与分离,如细胞分割、核径迹及谷物分割等重叠颗粒识别测量的应用环境中。

参考文献:

- [1] 郭士伦,张东海,王宇钢. 固体核径迹研究进展[J]. 山西师范大学学报(自然科学版), 2017,31(1):40-49. (GUO Shilun, ZHANG Donghai, WANG Yugang. Advances in studies of nuclear tracks in solids[J]. Journal of Shanxi Normal University (Social Science Edition), 2017,31(1):40-49.)
- [2] 关涛. 光学显微宫颈细胞图像的分割与识别方法研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2015. (GUAN Tao. Segmentation and classification of optical microscopic cervical cell images[D]. Changsha, China: National University of Defense Technology, 2015.)
- [3] GHERGHEREHCHI M, KIM S Y A, FARIDEH H, et al. Improvement of overlapping nuclear track densitometry[J]. Journal of Microscopy, 2015,257(3):179-186.
- [4] AZAR N A, BABAKHANI A, BROUMANDNIA A. A novel method for detecting and counting overlapping tracks in SSNTD by image processing techniques[J]. Radiation Measurements, 2016(91):36-43.
- [5] 过惠平,姚红伟,叶红兵,等. 基于流域算法的重叠核径迹图像分割方法研究[J]. 核科学与工程, 2007,27(3):213-217. (GUO Huiping, YAO Hongwei, YE Hongbing, et al. Research on the overlapping nuclear track image segmentation based on watershed algorithm[J]. Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering, 2007,27(3):213-217.)
- [6] 杨辉华,赵玲玲,潘细朋,等. 基于水平集和凹点区域检测的粘连细胞分割方法[J]. 北京邮电大学学报, 2016,39(6):11-16. (YANG Huihua, ZHAO Lingling, PAN Xipeng, et al. Overlapping cell segmentation based on level set and concave area detection[J]. Journal of Beijing University of Posts And Telecommunications, 2016,39(6):11-16.)
- [7] 王鑫,胡洋洋,杨慧中. 基于迭代腐蚀的粘连细胞图像分割研究[J]. 南京理工大学学报, 2016,40(3):285-289. (WANG Xin, HU Yangyang, YANG Huizhong. Segmentation of adherent cell image based on iterative erosion[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2016,40(3):285-289.)
- [8] FELIX BAUTISTA R, HERNANDEZ C, ZENDEJAS L B, et al. Evolution of etched nuclear track profiles of alpha particles in CR-39 by atomic force microscopy[J]. Radiation Measurements, 2013,50(SI):197-200.
- [9] 陈强. 基于聚类技术的多阈值图像分割技术[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018,16(4):715-718. (CHEN Qiang. Multi-threshold image segmentation based on clustering method[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018,16(4):715-718.)

作者简介:

张劲峰(1970-),男,博士,讲师,主要研究方向为视觉测量和图像处理,email:zhangjinfeng70@163.com.