

一种适应多方向灰度梯度变化的自动对焦评价函数

熊锐^{1,3*}, 顾乃庭^{2,3}, 徐洪艳^{1,3**}¹中国科学院光电技术研究所质检中心, 四川 成都 610209;²中国科学院光电技术研究所自适应光学重点实验室, 四川 成都 610209;³中国科学院大学, 北京 100049

摘要 当利用传统聚焦评价函数对微纳结构进行自动对焦时,微纳结构边缘方向的多样性会导致对焦稳定性差和灵敏度低。针对上述问题,对比分析了传统的聚焦评价函数,并将Brenner函数和Roberts函数相结合,提出了一种新的聚焦评价函数——Brenner2d_Roberts函数。通过实验获取了三组不同边缘方向的微结构显微图像,并对生成的对焦评价曲线及相关的评价指标进行了对比分析。结果表明,与SMD、Brenner和Roberts等传统聚焦评价函数相比,所提聚焦评价函数在多个显微图像边缘方向上均表现出良好的对焦性能,且具有更好的稳定性和更高的灵敏度。

关键词 显微; 自动对焦; 显微图像; 聚焦评价函数; 稳定性

中图分类号 O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0418001

An Auto-Focusing Evaluation Function Adapted to Multi-Directional Gray Gradient Change

Xiong Rui^{1,3*}, Gu Naiting^{2,3}, Xu Hongyan^{1,3**}

¹Quality Inspection Center, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

²Key Laboratory of Adaptive Optics, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;

³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract When the traditional focus evaluation function is used to automatically focus the micro-nano structure, the diversity of the edge direction of the micro-nano structure will lead to poor focus stability and low sensitivity. In view of the above problem, the traditional focus evaluation functions are compared and analyzed, and a new focus evaluation function, i. e., Brenner2d_Roberts function is proposed by combining the Brenner function and Roberts function. Three groups of microstructure images with different edge directions are obtained through experiments, and the focus evaluation curves and related evaluation indexes are compared and analyzed. The results show that, compared with the traditional focus evaluation functions such as SMD, Brenner and Roberts, the proposed focus evaluation function shows better focus performance in multiple edge directions of microscopic images, and has better stability and higher sensitivity.

Key words microscopy; auto-focusing; microscopic image; focus evaluation function; stability

收稿日期: 2021-01-08; 修回日期: 2021-02-25; 录用日期: 2021-03-19

基金项目: 国家自然科学基金(12022308)

通信作者: *1769509809@qq.com; **xhy@ioe.ac.cn

1 引言

在微纳结构的缺陷检测中,首先需要借助显微镜获取微纳结构的清晰图像。显微镜作为一种高放大倍数的光学仪器,具有景深小和视野窄的特点^[1]。因此,利用显微镜完成整个器件的检测需要多次重复对焦,而对焦过程仍然依靠的是传统的手动对焦方式,进而存在耗费人力、速度慢且效率低的缺点。

随着数字图像处理技术的快速发展,基于图像处理的自动对焦技术受到越来越多的关注,它可以与显微镜结合实现对一些微纳器件的缺陷检测。聚焦评价函数作为自动对焦中的关键部分,其性能的好坏直接影响自动对焦的有效性和准确性。因此,提升自动对焦技术的主要途径之一就是开展对自动聚焦评价函数的研究。目前,聚焦评价函数主要分为频域类、空域类和信息学类。

频域类函数主要有傅里叶变换和离散余弦变换等,该类函数具有很高的灵敏度,但计算量过大,实时性较差,进而实际运用很少。信息学函数也叫熵函数,可利用正焦图像比离焦图像熵值大的特点实现自动对焦,该类函数无偏性较好,但计算过程复杂,灵敏度低。空域类函数主要有 Roberts 函数、Brenner 函数、Sobel 函数和 SML 函数等,这类函数计算原理简单、稳定性好、效率高,是目前最受关注的一类聚焦评价函数。张丰收等^[2]将 4 方向的 Sobel 函数与 Brenner 函数相乘,得到一种改进的 Sobel 自动对焦算法,该算法相较于传统的梯度函数具有更强的抗噪声能力,对细胞显微图像的清晰度变化更敏感。徐贵力等^[3]提出了一种以图像边缘灰

度变化率为指标的图像清晰度评价方法,该方法相比相邻像素灰度方差法和方差法,具有更高的灵敏度。郑馨等^[4]将灰度方差函数与梯度函数相结合,提出了 VarGrad 聚焦评价函数,该函数对细节较多和较少的显微图像均有较好的适应性。

通过目前的研究可以发现,针对聚焦评价函数的改进大多是根据具体的应用背景展开的。因此,本文针对微纳结构显微图像边缘方向多样性变化导致的对焦稳定性问题,结合 Brenner 函数和 Roberts 函数,提出了一种能适应多方向灰度梯度变化的自动聚焦评价函数。该聚焦评价函数首先在 Brenner 函数的基础上增加了对 y 方向的梯度计算。然后,通过与 Roberts 函数相乘的方式,增加了斜向的梯度计算。对三组不同边缘方向的显微图像分析表明,所提聚焦评价函数相较传统聚焦评价函数在三组显微图像上均有更好的评价能力,且稳定性更好。

2 传统的空域类聚焦评价函数

沿图像边缘方向灰度变化平缓,垂直于图像边缘方向灰度变化剧烈,清晰图像相较模糊图像在边缘处的灰度差异会更明显^[5]。空域类聚焦评价函数就是利用上述原理,计算像素灰度的梯度信息进而评价图像的清晰度。目前比较有代表性的空域类聚焦评价函数有 SMD 函数、Roberts 函数、Sobel 函数、Brenner 函数和 SML 函数等。

2.1 SMD 函数

设 $f(x, y)$ 为图像在像素点 (x, y) 处的灰度值,图像像素数为 $M \times N$,则 SMD 函数可以表示为

$$F_{\text{SMD}} = \sum_{x=1}^{M-1} \sum_{y=1}^{N-1} \left[\left| f(x+1, y) - f(x, y) \right| + \left| f(x, y+1) - f(x, y) \right| \right]. \quad (1)$$

SMD 函数由 Jarvis 等于 1976 年提出,原理为将 x 与 y 方向上相邻两个像素灰度值之差的绝对值相加^[6]。该函数只有加法运算,是目前最简单的一种聚焦评价函数。

2.2 Roberts 函数

Roberts 函数计算的是对角方向的梯度值,对 $\pm 45^\circ$ 方向灰度变化明显的图像评价效果较好,其表达式为

$$F_{\text{Roberts}} = \sum_{x=1}^{M-1} \sum_{y=1}^{N-1} \left[\left| f(x, y) - f(x+1, y+1) \right| + \left| f(x+1, y) - f(x, y+1) \right| \right]. \quad (2)$$

2.3 Sobel 函数

Sobel 函数的计算过程是计算出 x 方向和 y 方向的梯度变化后相加再取绝对值。Sobel 函数增大

了中心像素上下左右方向的权重,进而在一定程度上能抑制噪声,其计算表达式为

$$F_{\text{Sobel}} = \sum_{x=2}^{M-1} \sum_{y=2}^{N-1} |f_x(x, y) + f_y(x, y)|, \quad (3)$$

$$f_x(x, y) = f(x+1, y-1) - f(x-1, y-1) + 2f(x+1, y) - 2f(x-1, y) + f(x+1, y+1) - f(x-1, y+1), \quad (4)$$

$$f_y(x, y) = f(x-1, y-1) - f(x-1, y+1) + 2f(x, y-1) - 2f(x, y+1) + f(x+1, y-1) - f(x+1, y+1). \quad (5)$$

2.4 Brenner 函数

与 2.1~2.3 节的函数相比, Brenner 函数仅考虑 x 方向上的梯度变化, 计算了相差 2 pixel 像素点的梯度差, 可以理解为二阶梯度^[7]。同时, 由于该函数进行了平方运算, 故会增大边缘的贡献。Brenner 函数的表达式为

$$F_{\text{Brenner}} = \sum_{x=1}^{M-2} \sum_{y=1}^{N-2} [f(x+2, y) - f(x, y)]^2. \quad (6)$$

2.5 SML 函数

SML 函数由拉普拉斯算子改进而来, 计算图像水平、竖直方向二阶差分绝对值之和, 其表达式为

$$F_{\text{SML}} = \sum_{x=2}^{M-2} \sum_{y=2}^{N-2} [|2f(x, y) - f(x-1, y) - f(x+1, y)| + |2f(x, y) - f(x, y-1) - f(x, y+1)|]^2. \quad (7)$$

图 1 为理想的聚焦评价函数曲线图。无论何种聚焦评价函数, 对图像进行清晰度评价时, 生成的对焦评价曲线都应满足如下特性。

1) 单峰性

聚焦评价函数应具有唯一的最大值, 且随着离焦程度的增大, 函数值会逐渐减小, 即在评价曲线最大值两侧, 函数值分别是单调递增和单调递减的^[8]。

2) 无偏性

聚焦评价函数的最大值, 对应于最佳成像位置, 此处采集的图像最清晰。

3) 高灵敏度

对焦时需要对轻微离焦状态的图像与正焦图像进行区分, 进而需要聚焦评价函数对图像微小的

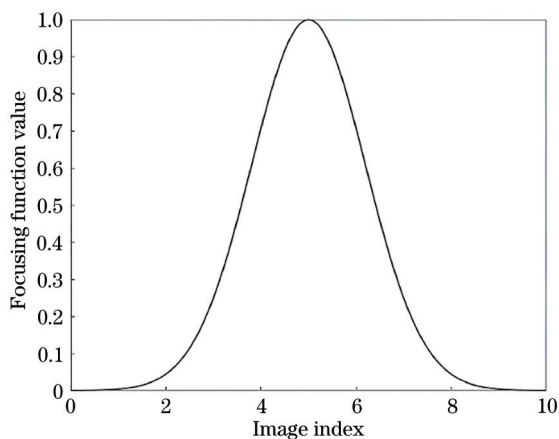


图 1 理想的对焦评价曲线

Fig. 1 Ideal focusing evaluation curve

清晰度变化能产生较大的反应, 这样评价曲线就不至于过于平缓, 对焦搜索的效率也会更高^[9]。

3 Brenner2d_Roberts 梯度函数

为了对比分析传统空域类聚焦评价函数对微纳结构显微图像对焦时的对焦性能, 实验采集了一系列从模糊到清晰再到模糊的显微图片, 并对其进行了仿真分析, 采集的正焦图片如图 2 所示。图 3 为生成的对焦评价曲线。



图 2 正焦图像

Fig. 2 Focus image

从图 3 中可以发现, Brenner 函数位于所有曲线的下侧, 对焦灵敏度最高, 在极值附近的对焦搜索区间最小, 因此本文在 Brenner 函数的基础上进行改进。经典的 Brenner 函数仅在 x 方向进行梯度计

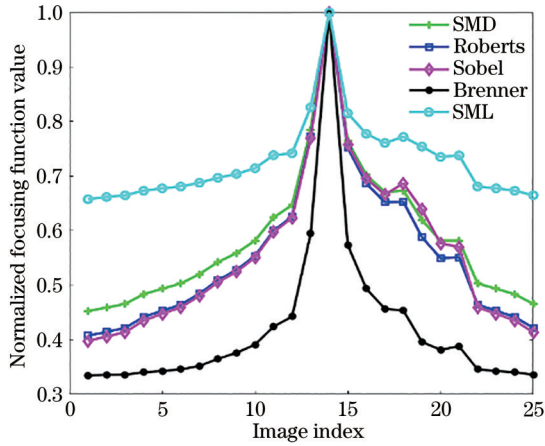


图 3 传统函数的对焦评价曲线

Fig. 3 Focusing evaluation curves of traditional functions

$$F_{Bre2d} = \sum_{x=1}^{M-2} \sum_{y=1}^{N-2} [f(x+2, y) - f(x, y)] \cdot [f(y+2) - f(x, y)]. \quad (8)$$

由于 Brenner2d 函数增加了 y 方向的梯度计算, 故其对 y 方向灰度变化剧烈的图像的评价效果较好。此外, Brenner2d 函数计算的灰度梯度方向更符合人眼的视觉判断。在算法复杂度方面, Brenner2d 函数只进行了两次减法运算和一次乘法运算, 相比 Brenner 函数计算量没有增加, 进而实时性得到了保证^[12]。为了对比改进前后 Brenner 函数的对焦灵敏度, 对实验采集的一系列模糊程度不同的显微图像进行清晰度评价, 生成的对焦评价曲线如图 4 所示。

由图 4 可知, Brenner2d 函数的对焦灵敏度相比原 Brenner 函数更高, 说明增加图像梯度信息的提取方向, 在一定程度上能够提高对焦灵敏度。因此, 本文在 Brenner2d 函数的基础上再增加 ±45° 方向的梯度运算。由 Roberts 函数表达式可知, 其仅计算对角方向的梯度值, 进而对 ±45° 方向灰度变化明显的显微图像比较敏感。本文将 Brenner2d 函数与 Roberts 函数相结合, 得到一个新的聚焦评价函数 Brenner2d_Roberts 函数 (简称 Bre2d_Rob 函数), 该函数结合

算, 对于 y 方向的梯度变化不敏感, 可以看作是图像中每一个像素点与水平滤波器 [-1 0 1] 做卷积运算。同时, 对人类视觉系统 (HVS) 的研究发现^[10-11], HVS 对不同方向、不同频率和不同颜色的刺激的敏感度是不同的。对不同方向的刺激研究表明, HVS 对水平方向和垂直方向的刺激最敏感。

根据 Brenner 函数的特点并结合 HVS 特性, 在 Brenner 函数的基础上增加一个 y 方向的滤波器 [-1 0 1]^T, 这样改进后的 Brenner 函数 (Brenner2d 函数) 对显微图像水平和垂直方向的梯度变化都能有较好的评价效果。Brenner2d 函数表达式为

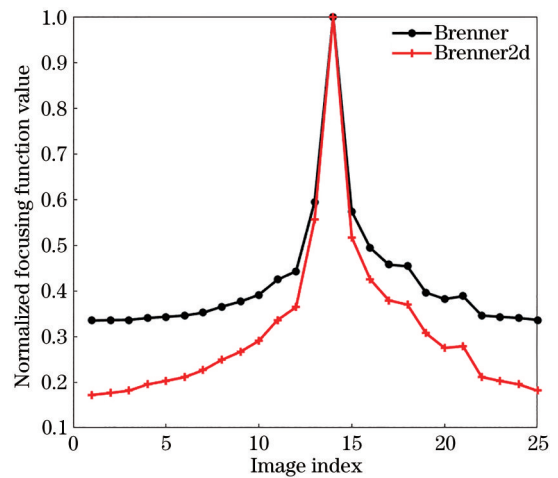


图 4 Brenner 函数与 Brenner2d 函数的对焦评价曲线

Fig. 4 Focusing evaluation curves of Brenner function and Brenner2d function

了 Brenner2d 函数和 Roberts 函数的优点, 能更全面地提取显微图像不同方向的灰度梯度信息, 且稳定性更好^[13]。Bre2d_Rob 函数的表达式为

$$F_{Bre2d_Rob} = \sum_{x=1}^{M-2} \sum_{y=1}^{N-2} [f(x+2, y) - f(x, y)] \cdot [f(y+2) - f(x, y)] \cdot [|f(x, y) - f(x+1, y+1)| + |f(x+1, y) - f(x, y+1)|]. \quad (9)$$

Bre2d_Rob 函数可以从多个方向提取显微图像的灰度梯度信息, 当图像边缘方向改变时, 该函数总会存在一个起主导作用的灰度梯度方向, 进而能够适应不同方向的灰度梯度变化, 且在显微自动对

焦时稳定性更好^[14]。

4 实验结果与分析

为了说明 Bre2d_Rob 聚焦评价函数有更好的稳

定性和灵敏度,选取了 SMD 函数、Roberts 函数、Sobel 函数、Brenner 函数和 SML 函数进行对比。实验通过对微纳标准样件显微成像,采集了 A、B、C 三组不同边缘方向的从模糊到清晰再到模糊的显微图

像,每组均包含 39 幅图像,正焦图像为第 21 幅,步长为 20 μm,图像像素数为 1280×960。其中,A、B、C 三组显微图像的边缘方向分别在 x 方向、 y 方向、45° 方向,每组正焦图像分别如图 5(a)~(c)所示。

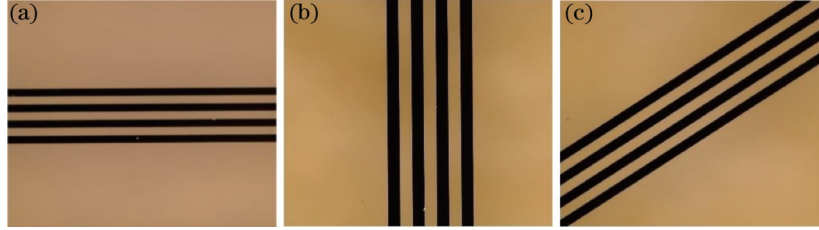


图 5 A、B、C 三组的显微正焦图像。(a) A 组;(b) B 组;(c) C 组

Fig. 5 Microscopic focus images of groups A, B and C. (a) Group A; (b) group B; (c) group C

实验所用计算机的 CPU 型号为 AMDR5-3500H,主频为 2.1 GHz,内存为 16 GB。算法采用 MATLAB 编程实现。由于聚焦评价函数数量纲各不同,为了便于比较,将聚焦评价函数值做归一化处理,归一化表达式为

$$f = \frac{Z_i}{Z_{\max}}, \quad (10)$$

式中: Z_i 为第 i 幅图像的聚焦评价函数值; Z_{\max} 为所

有图像中聚焦评价函数的最大值。A、B、C 三组显微图像归一化后的对焦评价曲线分别如图 6(a)~(c)所示。

为了定量对比提出的 Bre2d_Rob 聚焦评价函数与传统聚焦评价函数的性能,选取了清晰度比率 R 、灵敏度 M_{SE} 、局部峰值数量 α 、对焦搜索区间 β 和算法耗时 τ 性能评价指标来进行对比分析,相关指标定义如下。

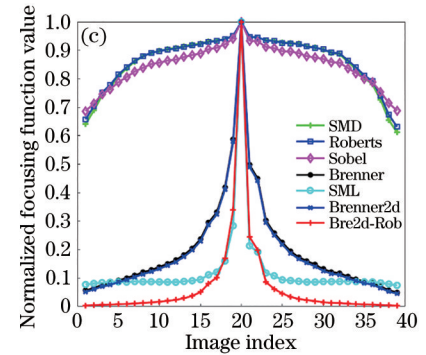
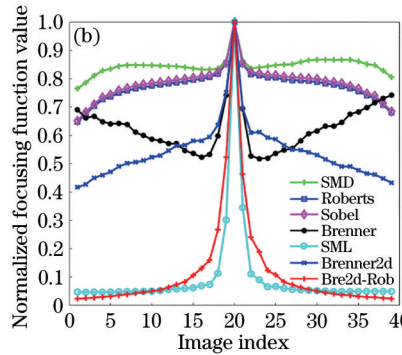
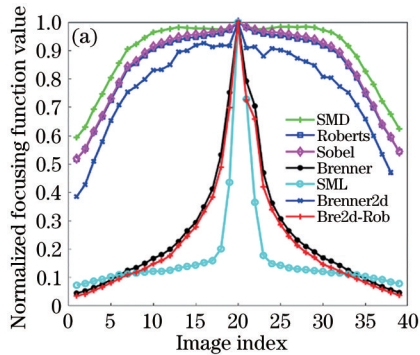


图 6 A、B、C 三组显微图像的归一化对焦评价曲线。(a) A 组;(b) B 组;(c) C 组

Fig. 6 Normalized focusing evaluation curves of microscopic images of groups A, B and C. (a) Group A; (b) group B; (c) group C

清晰度比率 R 表达式为

$$R = \frac{f_{\max}}{f_{\min}}, \quad (11)$$

式中: f_{\max} 和 f_{\min} 分别为聚焦评价函数的最大值与最小值。清晰度比率越高,说明聚焦评价函数区分正焦图像与模糊图像的能力越强^[15]。

灵敏度 M_{SE} 可表征聚焦评价函数在最大值附近变化的剧烈程度。灵敏度值越大,说明聚焦评价函数对图像的清晰度变化越敏感,进而更容易聚焦成功^[16]。灵敏度 M_{SE} 定义为

$$M_{SE} = \frac{f_{\max} - f(x_{\max} + \Delta x)}{f(x_{\max} + \Delta x)}, \quad (12)$$

式中: $f(x_{\max} + \Delta x)$ 为聚焦评价函数横坐标 x_{\max} 变化 Δx 后的函数值,本文 Δx 取 3。

α 为对焦评价曲线的局部峰值数量, α 越小说明聚焦评价函数抗干扰能力越强,稳定性越高。对焦搜索区间 β 为聚焦评价函数值取 0.8 时的区间大小,搜索区间越小越容易到达正焦位置,算法耗时 τ 为评价一幅图像所需的时间,该值越小表明实时性越好。

A、B、C 三组显微图像在上述 5 种评价指标上的对比结果分别如表 1~3 所示。

从图 6(a)中可以发现,当图像边缘主要在 x 方

表 1 A 组聚焦评价函数的评价指标
Table 1 Evaluation indexes of focus evaluation
function of group A

Function	R	M_{SE}	α	β	τ / ms
SMD	1.68	0.02	4	30	24.93
Roberts	1.93	0.05	0	27	25.29
Sobel	1.93	0.04	0	27	62.18
Brenner	22.17	1.43	0	1	14.57
SML	13.74	5.27	0	1	49.40
Bre2d	2.59	0.09	4	21	26.15
Bre2d_Rob	28.25	1.61	0	1	43.53

表 2 B 组聚焦评价函数的评价指标
Table 2 Evaluation indexes of focus evaluation
function of group B

Function	R	M_{SE}	α	β	τ / ms
SMD	1.31	0.20	6	36	24.99
Roberts	1.54	0.24	0	8	26.99
Sobel	1.53	0.23	0	14	58.87
Brenner	2.57	0.88	33	1	19.37
SML	20.96	12.46	1	1	36.46
Bre2d	2.40	0.68	3	1	23.90
Bre2d_Rob	41.85	5.27	0	1	42.36

表 3 C 组聚焦评价函数的评价指标
Table 3 Evaluation indexes of focus evaluation
function of group C

Function	R	M_{SE}	α	β	τ / ms
SMD	1.56	0.07	0	30	24.47
Roberts	1.52	0.07	0	30	25.29
Sobel	1.46	0.02	0	29	67.04
Brenner	17.79	2.02	0	1	15.03
SML	12.97	7.29	7	1	39.03
Bre2d	19.42	2.09	0	1	33.97
Bre2d_Rob	263.16	8.78	0	1	46.30

向时, SML 函数对焦评价曲线在所有曲线下方, 灵敏度最高; Bre2d_Rob 函数次之; Brenner 函数灵敏度稍差于 Bre2d_Rob 函数; Brenner2d 函数、Sobel 函数和 Roberts 函数的灵敏度较差, 而 SMD 函数的灵敏度最差。表 1 中的定量评价指标也体现了图 6(a) 中的定性分析结果, Bre2d_Rob 函数和 SML 函数均有 3 个指标取得最优值, 其中 SML 函数的 M_{SE} 指标优于 Bre2d_Rob 函数, 而 Bre2d_Rob 函数的 R 指标优于 SML 函数, 两者在 α 指标和 β 指标上表现相当, 在 τ 指标上 Bre2d_Rob 函数略优于 SML 函数。图 6(a) 和表 1 的数据表明, 当显微图像边缘主

要在 x 方向时, Bre2d_Rob 函数和 SML 函数分别在清晰度比率和灵敏度上表现较好, 进而均能很好地评价图像清晰度。

当图像边缘方向主要在 y 方向时, 如图 6(b) 所示, 虽然 Bre2d_Rob 函数的灵敏度次于 SML 函数, 但是 SML 函数在远离正焦位置处, 曲线变化平坦, 进而 SML 函数对深度离焦的图像变化不敏感。由于 Brenner 函数仅计算了 x 方向的灰度梯度变化, 只在正焦位置附近极小的区间满足单调性, 因此对较远位置的显微图像不再适用。与 Brenner 函数相比, 由于 Brenner2d 函数增加了 y 方向的灰度梯度计算, 故其仍然有很好的适应性。表 2 中的数据表明, 虽然 Bre2d_Rob 函数的灵敏度和算法耗时略低于 SML 函数, 但其在 R 、 α 、 β 指标上均取得最优值, 进而综合性能更好。图 6(b) 和表 2 的数据表明, 当显微图像边缘主要在 y 方向时, Bre2d_Rob 函数整体表现最佳, 能更好地评价图像清晰度。

当图像边缘方向主要在 45° 方向时, 从图 6(c) 中可以发现, Bre2d_Rob 函数曲线在正焦位置附近几乎和 SML 函数曲线重合, 即两函数灵敏度相差不大。然而, SML 函数在远离正焦位置处, 曲线先上升再下降, 此时不再满足单调性。在算法耗时方面, 两者依然相近。Brenner 函数和 Brenner2d 函数的灵敏度次优。虽然 Sobel、Roberts 和 SMD 函数灵敏度依然较差, 但是 Sobel 函数相较 Roberts 和 SMD 函数灵敏度更高。从表 3 的数据中可以发现, Bre2d_Rob 函数在 M_{SE} 指标上已经超过 SML 函数, 且有 4 个指标取得最优值, 明显优于其他聚焦评价函数。

综上所述, 相比传统聚焦评价函数, Bre2d_Rob 函数在 3 组微结构显微图像上均有良好的适应性, 对焦灵敏度没有受到图像边缘变化的影响, 对焦稳定性最好。同时, Bre2d_Rob 函数的算法耗时 τ 和 SML 函数相近, 且明显优于 Sobel 函数, 进而满足聚焦实时性的要求。

5 结 论

针对在微纳结构器件显微自动对焦过程中边缘方向多样性引起的对焦稳定性差、灵敏度低等问题, 提出了 Bre2d_Rob 聚焦评价函数。该函数结合了 Brenner2d 函数和 Roberts 函数的优势, 具有在多个方向提取显微图像灰度梯度信息的能力, 特别适合于多边缘方向的大尺度微纳器件的快速自动聚

焦。然而, Bre2d_Rob 函数作为一种空域类的聚焦评价函数, 在对焦精度上依然不如频域类聚焦评价函数。因此, 其不适用于对精度要求特别高的使用场景。

Bre2d_Rob 聚焦评价函数可在多个方向计算灰度梯度, 当图像边缘主要在水平和垂直方向时 Brenner2d 函数对清晰度值贡献较大; 当图像边缘发生倾斜时, Roberts 函数有较好的评价能力。因此, Bre2d_Rob 聚焦评价函数对图像边缘变化具有更好的鲁棒性。实验结果表明, Bre2d_Rob 函数在 3 组显微图像上的清晰度比率、局部峰值数量和对焦搜索区间等指标明显优于传统聚焦评价函数, 能适应不同边缘方向的灰度梯度变化, 灵敏度更高, 这在一定程度上解决了微纳结构器件在显微自动对焦时所面临的问题。

参 考 文 献

- [1] Xin H T. Microscope equipped with a new auto-focusing system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 1986, 23(1): 28.
忻华泰. 装有新型自动聚焦系统的显微镜[J]. 激光与光电子学进展, 1986, 23(1): 28. [知网]
- [2] Zhang F S, Li S W, Hu Z G, et al. An improved auto-focus evaluating algorithm based on Sobel gradient function[J]. Optical Technique, 2017, 43(3): 234-238.
张丰收, 李斯文, 胡志刚, 等. 一种改进的 Sobel 梯度函数自动对焦评价算法[J]. 光学技术, 2017, 43(3): 234-238.
- [3] Xu G L, Liu X X, Tian Y P, et al. Image clarity-evaluation-function method[J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(1): 180-184.
徐贵力, 刘小霞, 田裕鹏, 等. 一种图像清晰度评价方法[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(1): 180-184.
- [4] Zheng X, Ai L F, Liu K, et al. Auto-focusing function for microscopic images based on global and local gray-scale variation[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(8): 081801.
郑馨, 艾列富, 刘奎, 等. 结合全局和局部灰度变化的显微图像自动聚焦函数[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(8): 081801.
- [5] Wang Z, Zhong H X, An C, et al. Design of auto-focus system based on digital image processing on overlapped sections[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(4): 042801.
王哲, 钟海秀, 安超, 等. 基于重叠区图像处理的自动调焦系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(4): 042801.
- [6] Liang H, Gao J, Huang Y L, et al. Research on autofocus algorithm for white light scanning interference [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2019, 40(5): 726-731.
梁航, 高健, 黄义亮, 等. 白光扫描干涉过程的自动对焦方法研究[J]. 半导体光电, 2019, 40(5): 726-731.
- [7] Huang D T. Study on auto-focusing method using image technology[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2013.
黄德天. 基于图像技术的自动调焦方法研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2013.
- [8] Xiang K, Gao J. Research on the image definition evaluation algorithm in autofocus process[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2019(1): 52-55.
项魁, 高健. 自动对焦过程中图像清晰度评价算法研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2019(1): 52-55.
- [9] Bai T S. Research on optical microscopic auto-focus based on visual image[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017.
柏天舒. 基于视觉图像的光学显微自动对焦技术研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.
- [10] Campbell F W, Kulikowski J J. Orientational selectivity of the human visual system[J]. The Journal of Physiology, 1966, 187(2): 437-445.
- [11] Nachmias J, Weber A. Discrimination of simple and complex gratings[J]. Vision Research, 1975, 15(2): 217-223.
- [12] Bi T H, Du W H. Improved Brenner definition evaluation function[J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 42(9): 80-84.
毕天华, 杜文华. 一种改进的 Brenner 清晰度评价函数[J]. 电子测量技术, 2019, 42(9): 80-84.
- [13] Jin X L. Research on auto-focusing technology for the textile microscope[D]. Xi'an: Xi'an Polytechnic University, 2011.
金小亮. 纺织专用显微自动对焦技术研究[D]. 西安: 西安工程大学, 2011.
- [14] Lu P L. Study on auto-focusing methods based on image processing technology[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2016.
路朋罗. 基于图像处理技术的自动调焦方法研究

- [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2016.
- [15] Zhai Y P, Zhou D X, Liu Y H, et al. Design of evaluation index for auto-focusing function and optimal function selection[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(4): 0418002.
翟永平, 周东翔, 刘云辉, 等. 聚焦函数性能评价指标设计及最优函数选取[J]. 光学学报, 2011, 31(4): 0418002.
- [16] Li Y F, Chen N N, Zhang J C. Fast and high sensitivity focusing evaluation function[J]. Application Research of Computers, 2010, 27(4): 1534-1536.
李郁峰, 陈念年, 张佳成. 一种快速高灵敏度聚焦评价函数[J]. 计算机应用研究, 2010, 27(4): 1534-1536.