

叠焦大景深成像中的聚焦评价算子性能评估方法

于春水, 卢荣胜*

合肥工业大学仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009

摘要 聚焦评价算法是叠焦大景深成像的核心, 针对聚焦评价算子性能评估方面的实验需求, 提出了一种基于图像序列采样点聚焦评价散点图高斯拟合的聚焦评价算子性能评估方法, 对已有的聚焦评价算子进行了性能评估实验。将传统的图像清晰程度指标加以改造, 提出了一种梯度加权图像锐度算子, 并采用实采图像和模拟图像分别对比了所提算子与现有算子的性能差异。研究结果对于实施叠焦测量有一定参考意义。

关键词 机器视觉; 叠焦测量; 大景深; 聚焦评价; 高斯拟合

中图分类号 TP391.4

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1415027

Performance Evaluation Method for Focusing Evaluation Operator in Superposed Large Depth Imaging

Yu Chunshui, Lu Rongsheng*

College of Instrument Science and Opto-Electronic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China

Abstract Focusing evaluation algorithms are the core of the superposed large depth of field imaging. Aiming at the experimental requirements of evaluating the performance of the focusing evaluation operator, we proposed a focusing evaluation operator performance evaluation method using image sequence sampling-point focusing evaluation and scatter plot Gaussian fitting. The performance evaluation experiments are performed on the existing focusing evaluation operators. Furthermore, we proposed a gradient-weighted image sharpness operator by modifying the traditional image sharpness index. The performance difference between the new and existing operators is compared using real and simulated images. The research results have certain reference significance for the implementation of stacking measurement.

Key words machine vision; focus stacking; large depth of field; focusing evaluation; Gaussian fitting

1 引言

叠焦测量是光学非接触测量中的一种重要方法^[1-3]。叠焦测量算法中的关键步骤是通过成像系统的物方焦平面对被测物体三维轮廓进行离散扫描切片成像, 获取离散图像序列后, 利用聚焦评价算子计算物体轮廓上每一个采样点所处焦平面, 或通过插值求出每一个采样点在哪两个焦平面之间, 即获得被测轮廓上每个采样点对应图像序列中的最佳聚焦点, 进而获取全聚焦图像^[2,4]。因此, 聚焦评价算子性能的好坏直接影响叠焦测量的精度。

2017年, Kwon^[4]等针对获取的全聚焦图像提出了一种聚焦评价算法和一种图像融合算法。同年, Shah

等^[5]在医学显微检验的实际应用中结合叠焦测量原理, 寻找到了最适用于医学样本显微检测的聚焦评价函数。2019年, Jang等^[6]结合叠焦测量的实际应用, 提出了一种新的焦点曲线拟合方法——局部回归法, 该方法将加权最小二乘回归作为非参数回归。2021年, Ali等^[7]将引导滤波应用于深度增强, 而且针对对shape from focus(SFF)框架的引导滤波器进行了系统的对比分析。2020年, 浙江大学的张健浦等^[8]利用共聚焦扫描的方法对光学元件进行了扫描实验, 是叠焦测量的一个重要应用。同年, 中北大学的王青青等^[9]使用变焦距成像获取了对应实验对象的全聚焦图。目前国内外关于叠焦测量领域的研究主要集中于新算法的开发、算法性能的评估、叠焦测量实际应用等方面。

收稿日期: 2021-05-25; 修回日期: 2021-05-26; 录用日期: 2021-07-28

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB2003801)、国家自然科学基金(51875164)

通信作者: *rslu@hfut.edu.cn

实际叠焦测量中,不同的叠焦测量仪器受到光学系统的成像性能、测试条件与工作环境的影响,通过叠焦的方法采集到的图像序列往往大相径庭^[10],且并没有标准图像可以参考。本文给出了一种无参考图像的叠焦测量聚焦评价算子性能分析方法,根据实验经验提出了一种新的像素域聚焦评价算子,并进行了实验验证。

2 理论研究

2.1 聚焦评价算法理论

在叠焦测量中,聚焦评价算法的关键在于选择一种有效的聚焦评价算子,并计算移动分层扫描成像方向上(如 z 轴方向)获得的图像序列里哪个分层(z 轴上的位置)像平面上哪个像素正好聚焦在物体表面上。一个理想的聚焦评价函数如图 1 所示,对它的基本要求包括:单峰性、灵敏度好、鲁棒性强、计算量小。

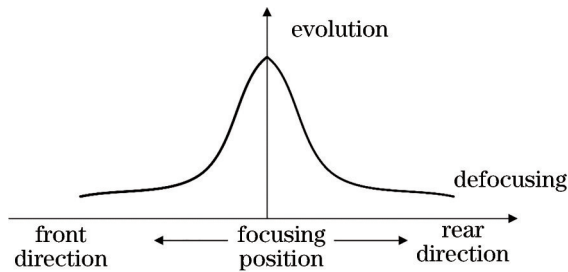


图 1 理想聚焦评价曲线
Fig. 1 Ideal focusing evaluation curve

已经开发出来的聚焦评价算子有几十种,其中像素域具有代表性的聚焦评价算子有基于 Brenner 算法的聚焦评价算子^[11]、基于边缘检测的 Roberts 算子^[12]、基于 Laplace 函数的聚焦评价算子^[13]及基于图像梯度的 GRA 算子^[14]。此外还有 Tenengard 算子、Sobel 算

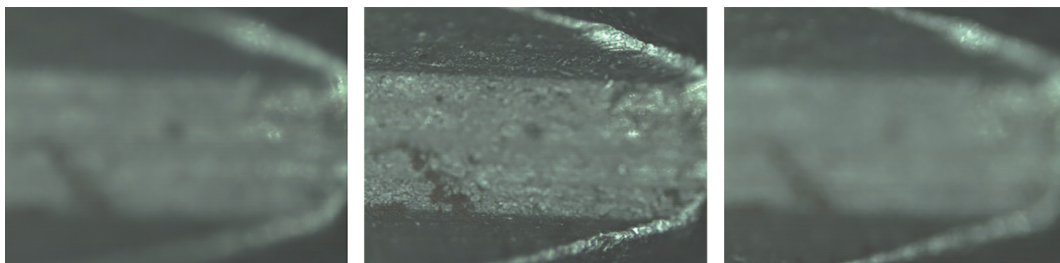


图 2 清晰程度不同的显微镜图像
Fig. 2 Microscope images with different clarity

表 1 不同峰数的拟合效果

Table 1 Fitting effect of different peak number

Number of terms	R^2	RMSE
1	0.5930	0.4000
2	0.9802	0.0895
3	0.9979	0.0293
4	0.9688	0.1162

子及 SMD 算子等。

2.2 基于高斯拟合的聚焦评价算子性能评估

理想的聚焦函数曲线应当可以很好地判别图像的清晰程度。这就要求选择的聚焦评价算子必须具有单峰性,同时在峰值附近数值变化越快越好。使用聚焦评价算子处理图像后,可得到一系列散点图,对这些离散点进行非线性拟合,也就是将这些数据用高斯函数系的形式进行描述。高斯函数拟合的主要问题在于函数峰数的选择及对应系数的求解。拟合峰数越多,拟合效果就越好,但是需要计算求解的系数就会增多,拟合耗时大大增加;拟合峰数过少,拟合效果就会很差。

图像灰度梯度是指在图像的边界或影线两侧附近的灰度有明显差异,即灰度变化率大,这种变化率的大小可用来表示图像清晰度。一般而言,梯度越大,图像层次越多,也就越清晰。图像的平均梯度的表达式为
$$\nabla \bar{G} = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \sqrt{\Delta x F(i,j)^2 + \Delta y F(i,j)^2}, \quad (1)$$
 式中: M 和 N 代表图像尺寸; $\Delta x F(i,j)$ 代表在 x 方向上的一阶差分; $\Delta y F(i,j)$ 代表在 y 方向上的一阶差分。

将显微镜载物台调节到显微镜焦平面上方不远处,然后令其按设定好的速度向下位移,超过焦平面之后继续位移一段距离,每次移动结束,采集一张图像,得到聚焦程度不同的图像序列,如图 2 所示。根据光学原理可知,图像序列中的图像聚焦程度是先逐渐变强,经过焦平面后又逐渐模糊的。计算每个图像的平均梯度得到散点图,并对散点图进行高斯拟合,观察不同峰数的拟合效果,表 1 为具体的拟合效果,其中 R^2 和 RMSE 分别表示拟合系数和均方根误差。由表 1 可以看出:峰数较少,拟合误差大;峰数太多,拟合难度越大,并且拟合效果也会偏离预期。

高斯函数可以拟合叠焦图像序列的聚焦程度,综合评估后选择使用 2 峰高斯函数对得到的实验数据进行拟合,2 峰高斯函数的表达式为

$$f(x) = a_1 \cdot \exp\left[-\left(\frac{x-b_1}{c_1}\right)^2\right] + a_2 \cdot \exp\left[-\left(\frac{x-b_2}{c_2}\right)^2\right], \quad (2)$$

式中: a_1 、 a_2 代表幅值; b_1 、 b_2 代表中心点位置; c_1 、 c_2 代

表峰宽。显然峰宽越小,聚焦评价算子搜索最佳聚焦点的能力就越强,越能满足本研究的需要。2峰高斯函数拟合结果如图3所示,从图3可以看出,2峰高斯函数可以将测试图像序列的散点图进行较为精确的拟合。

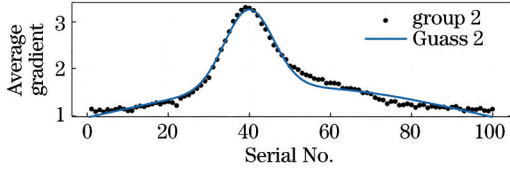


图3 2峰高斯拟合结果

Fig. 3 Fitting result of 2-peak Gaussian

2.3 一种新的聚焦评价算子

图像清晰程度的判别标准有很多,比如图像信息熵、标准差、平均梯度和锐度等,在传统的自动对焦领域,这些判别指标往往是对图像整体进行判别的,而聚焦评价算子是基于像素的。本实验组将传统的图像整体锐度评价指标加以改造,提出了一种新的聚焦评价算子。

选取图像上每个像素点周围 $n \times n$ 的邻域,计算该 $n \times n$ 大小区域的锐度,以此作为每个像素点的聚焦评价基础值。接下来对该聚焦评价基础值进行加权,求取每个像素所在邻域的图像梯度,将邻域梯度与图像总梯度之比作为聚焦评价基础值的权重系数。最终得到的结果就是每个像素位置的聚焦评价价值。这种算子称为梯度加权图像锐度算子(GWIS),可以描述为

$$F_{\text{GWIS}}(i, j) = \frac{g_n(i, j)}{G} \times E_n(i, j), \quad (3)$$

$$g_n(i, j) = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sqrt{\Delta x F(i, j)^2 + \Delta y F(i, j)^2}, \quad (4)$$

式中: $g_n(i, j)$ 表示点 (i, j) 附近大小为 $n \times n$ 的邻域的图像平均梯度; G 表示图像整体灰度梯度; $E_n(i, j)$ 表示点 (i, j) 附近大小为 $n \times n$ 的邻域的图像锐度。锐度的表达式为

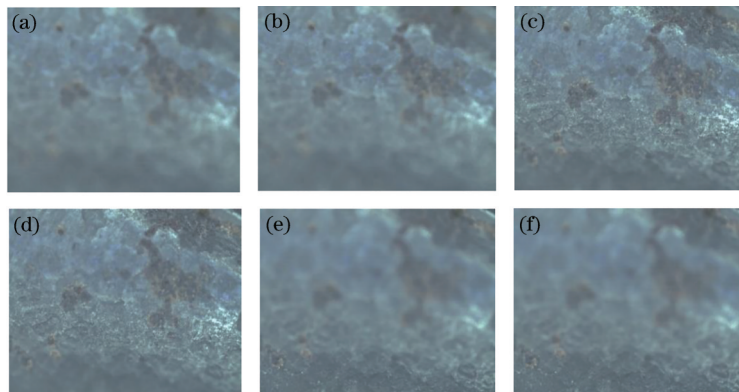


图5 钻头表面成像序列图。(a)第1张图;(b)第2张图;(c)第17张图;(d)第18张图;(e)第34张图;(f)第35张图

Fig. 5 Sequence diagrams of bit surface imaging. (a) 1st picture; (b) 2nd picture; (c) 17th picture; (d) 18th picture; (e) 34th picture; (f) 35th picture

$$F_{\text{EAV}} = \frac{\sum_a^b \left(\frac{df}{dx} \right)^2}{|f(b) - f(a)|}, \quad (5)$$

式中: df/dx 是边缘法向灰度变化率; $f(b) - f(a)$ 为整体的灰度变化。图像越清晰,图像清晰度数值就越大。

邻域大小 n 的选取来源于实验,结合在当前实验台的其他测试结果,选取的邻域大小为 17×17 。

3 实验及结果分析

3.1 实验系统搭建

为了获取叠焦图像序列,搭建了如图4所示的实验装置,它是由 X-Y 横向精密调节平台、纵向可调平台、与精密丝杠相连的步进电机及其驱动器、运动控制器共同构成的一个三维叠焦机构。叠焦图像序列的获取是通过日本东方公司 PK545 精密步进电机、DF5197P 电机驱动器和雷赛 DMC2210 运动控制卡在计算机的控制下实现的。相机采用 MVC-F 系列彩色数字相机,通过 USB 接口,不需要额外的采集设备,即可获得实时的无压缩视频数据并完成对图像的捕捉。实验中,通过移动相机来改变物体与成像透镜之间的距离,相机每移动一段距离采集一幅图像。图5展示

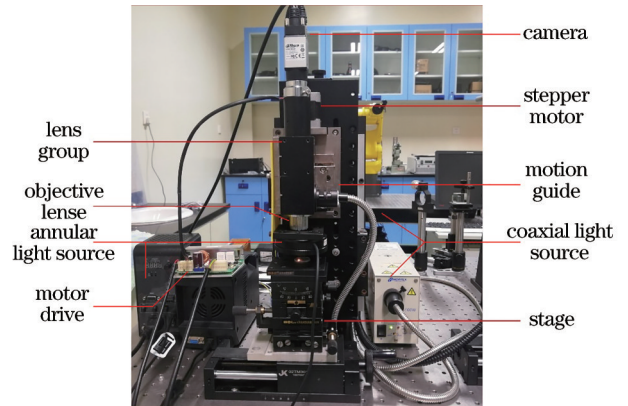


图4 实验系统

Fig. 4 Experimental system

了一个被测对象为钻头的扫描图像序列,共采集了 35 张图像,为了减少不必要的篇幅,图中间隔列出了 6 幅图像。

本次实验所用的软件运行环境为 Microsoft Windows 10、Intel Core i5-8400 CPU;运行内存为 8 GB;编程工具为 Matlab R2019a。

3.2 性能评估实验

在采集到的图像上选择 3 个具有代表性的点, A 点坐标为 (517, 382), 代表亮度正常的点, B 点坐标为 (957, 488), 代表亮度较强的点, C 点坐标为 (590, 618), 代表亮度较差的点, 如图 6 所示。

使用上述经典的聚焦评价算子分别处理这 3 个点, 设置窗口大小为 17; 得到不同位置的聚焦评价散点图。对得到的数据进行 2 峰高斯拟合, 拟合结果如图 7~9 所示。2 峰高斯拟合后得到的 c_1 和 c_2 参数如表 2 所示。

从上述的拟合图像不难看出, 使用 2 峰高斯函数拟合经典聚焦评价算子处理后得到的散点图的效果较为理想, 用高斯函数来描述聚焦评价算子曲线, 然后分析高斯函数的对应参数实现对聚焦评价算子的性能分析是可行的。

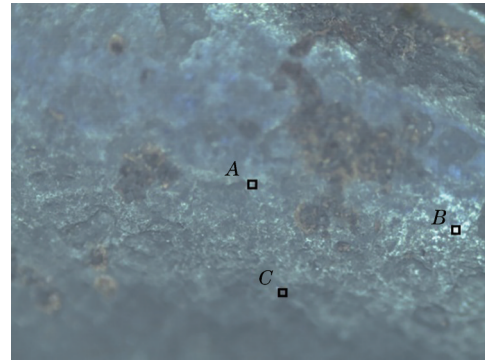


图 6 三个采样位置

Fig. 6 Three sampling locations

2 峰高斯函数对聚焦评价函数散点图拟合后, 其系数 c_1 和 c_2 的值越大, 表示该高斯函数曲线越平缓, 证明在该点处, 聚焦评价算子搜寻最佳聚焦点的能力越差; 同样的, 拟合后 c_1 和 c_2 的值越小, 代表高斯函数曲线越尖锐, 相应的聚焦评价算子搜寻最佳聚焦点的能力就越强。分析表 2 的数据可知, 从选取的 3 个代表性点来看, Brenner 算子处理后的散点图的 2 峰高斯拟合系数 c_1 和 c_2 的值相较于其他几个聚焦评价算子的更小, 因此 Brenner 算子搜索最佳聚焦位置的能力最强。

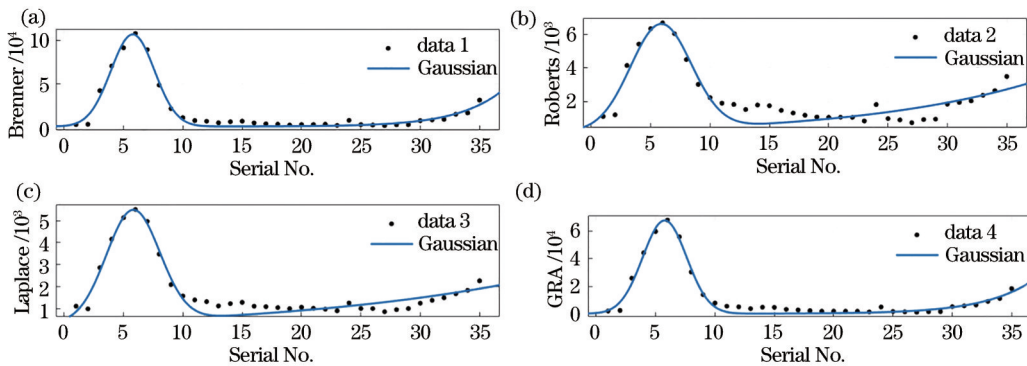


图 7 A 点处各算子拟合结果。(a) Brenner; (b) Roberts; (c) Laplace; (d) GRA

Fig. 7 Fitting results of operators at point A; (a) Brenner; (b) Roberts; (c) Laplace; (d) GRA

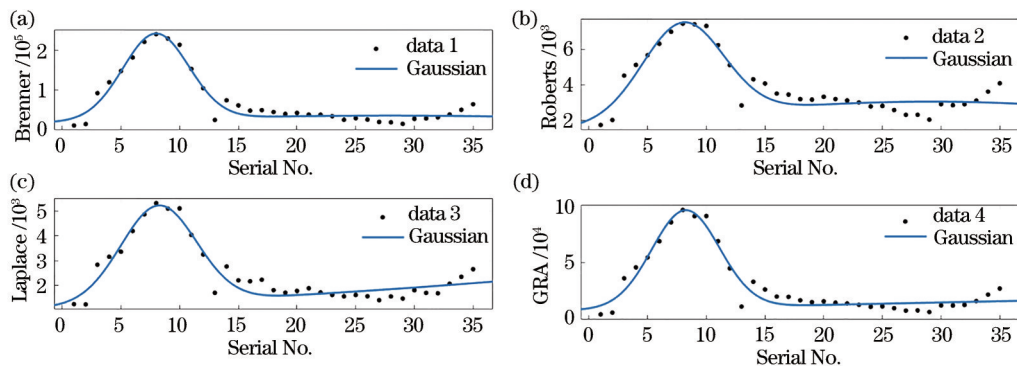


图 8 B 点处各算子拟合结果。(a) Brenner; (b) Roberts; (c) Laplace; (d) GRA;

Fig. 8 Fitting results of operators at point B; (a) Brenner; (b) Roberts; (c) Laplace; (d) GRA

通过选取图像序列上 3 个有代表性的点, 使用 2 峰高斯函数对其得到的聚焦评价散点图进行拟合, 分析

拟合后的高斯函数系数可知, Brenner 算子搜索最佳聚焦位置的能力最强。

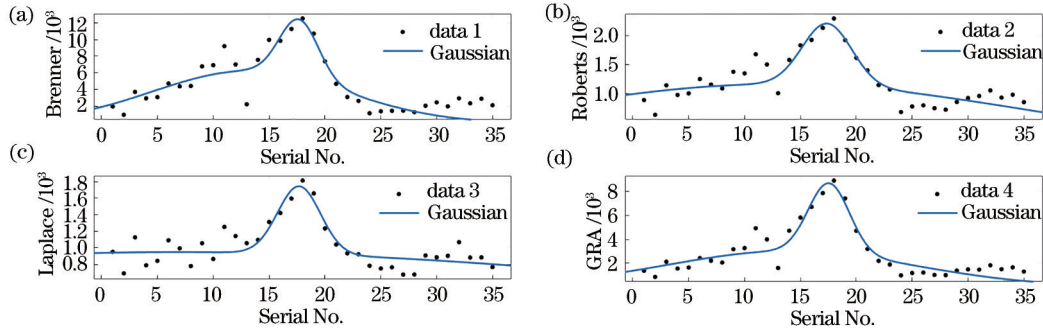


图 9 C 点处各算子拟合结果。(a) Brenner; (b) Roberts; (c) Laplace; (d) GRA;

Fig. 9 Fitting results of operators at point C; (a) Brenner; (b) Roberts; (c) Laplace; (d) GRA

表 2 不同位置各算子的拟合参数

Table 2 Fitting parameters of operators in different positions

Operator	Point A		Point B		Point C	
	c_1	c_2	c_1	c_2	c_1	c_2
Brenner	2.598	42.97	3.98	34.91	2.464	12.15
Roberts	3.614	167.6	4.872	37.95	3.3135	32.5
Laplace	3.177	240.6	4.562	653.1	2.712	69.12
GRA	2.613	47.37	4.082	78.42	2.593	15.61

3.3 GWIS 算子对比实验

A、B、C 3 个点使用 GWIS 拟合后的系数 c_1 和 c_2 如表 3 所示, C 点使用 GWIS 算子处理后的高斯拟合图像如图 10 所示。

表 3 不同采样点使用 GWIS 算子处理后的拟合结果

Tab.3 Fitting results of different sampling points processed by GWIS operator

Point	c_1	c_2
A	5.7810	147.8
B	0.3073	5.565
C	2.572	24.77

从表中的拟合数据可以看出, GWIS 算子的焦点搜索能力好于经典的聚焦评价算子, 尤其是在亮度较为极端的区域, 这是因为 GWIS 算子通过区域加权提高了鲁棒性; 并且其拟合精度比前述的几种经典聚焦

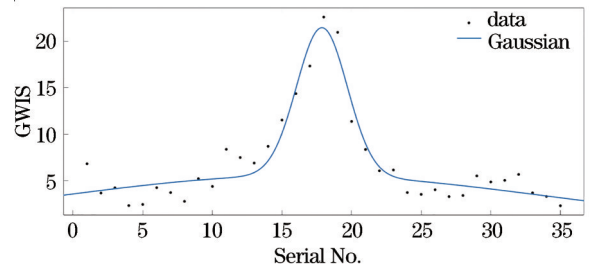


图 10 C 点 GWIS 算子拟合结果

Fig. 10 GWIS operator fitting results at point C

评价算子都要好。

此外, 对算法的优化使得 GWIS 算子在提升了精度的同时, 并没有增加时间复杂度, 不同算子处理一张图片所用时间如表 4 所示。不难得出结论, 梯度加权图像锐度算子作为叠焦测量中的聚焦评价算子是可行的, 最佳聚焦点搜索能力较好, 并且算法精度高。

表 4 不同算子处理一张图片所用的时间

Tab. 4 Time taken by different operators to process a picture

Operator	Brenner	Roberts	Laplace	GRA	GWIS
Time /s	1.4546	1.4431	1.4462	1.4296	1.4550

使用 GWIS 算子处理不同的图像序列得到的全聚焦图像如图 11 所示。这种基于梯度加权的图像锐度算子能够在图像序列中进行最佳聚焦点的搜索, 获取全聚焦图像, 能够在叠焦大景深成像中发挥作用。

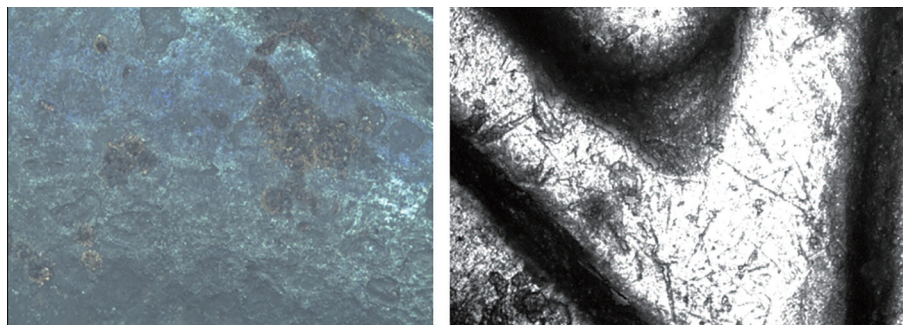


图 11 GWIS 算子获取的全聚焦图像

Fig. 11 All focus image obtained by GWIS operator

将用于图像整体清晰程度衡量的指标加以改造,对图像序列进行像素邻域扫描。配合邻域清晰度指数加权,以此作为像素域聚焦评价算子,这是叠焦测量聚焦评价方向的新思路。

使用包含理想图像的仿真叠焦图像序列^[15]对 GWIS 算子的性能进行分析。利用上述的像素域 Brenner 算子、Roberts 算子、Laplace 算子、GRA 算子、Tenengrad 算子、SMD 算子及 Sobel 算子对仿真叠焦图像序列进行处理,获取全聚焦图像。另外还选取了一种利用标准差(STD)的聚焦评价方法^[16]作为对照实验,进行相同处理;将得到的全聚焦图像与该仿真图像序列对应的理想图像进行对比,求取信噪比(SNR)、峰值信噪比(PSNR)及均方误差(MSE);使用 GWIS 算子也进行相同的操作。得到的实验数据如表 5 所示,其中 SNR、PSNR 更加偏重图像的整体差异,MSE 偏重于单个像素的差异。

表 5 有参考图像实验结果
Tab.5 Experimental results with reference images

Operator	SNR	PSNR	MSE / 10 ³
Brenner	13.8556	16.6182	1.4166
Roberts	13.8764	16.6182	1.4099
Laplace	14.0532	16.8158	1.3536
GRA	13.8486	16.6112	1.4189
Tenengrad	13.8310	16.5936	1.4247
SMD	13.9129	16.6755	1.3981
Sobel	13.1771	15.9397	1.6562
STD	13.7912	16.5538	1.4378
GWIS	13.9569	16.7195	1.3840

从表 5 可以看出,所提全新思路的梯度加权图像锐度算子处理有参考的叠焦图像序列后得到的全聚焦图像与参考理想图像的差距优于经典的 Brenner 算子、Roberts 算子、Tenengrad 算子、SMD 算子、Sobel 算子及 GRA 算子,仅弱于 Laplace 算子,并且在精度方面,GWIS 算子也比经典的聚焦评价算子更高。通过与标准差实验结果的对比也能发现,像素邻域分析能够显著增强聚焦评价算子的精度。这表明所提聚焦评价算子新思路能够达到搜索最佳聚焦点的目的,通过本研究给出的无参考聚焦评价算子性能分析方法和本领域已有的有参考聚焦评价算子性能分析方法的结果都可以得出结论,所提聚焦评价算子的理论是有效的、可行的。

4 结 论

聚焦评价算子是叠焦测量中搜索最佳聚焦点最重要的工具,其峰值搜索性能可以用高斯拟合的方法进行衡量,使用采样位置聚焦评价散点图高斯 2 峰拟合然后分析拟合系数,是聚焦评价算子性能分析的一个可行的方法。实验结果表明,在选取的几种经典聚焦评价算子中,Brenner 算子具有最强的最佳聚焦位置搜索性能。

将传统的用于整体图像清晰程度判别的指标加以改造,提出了一种梯度加权图像锐度聚焦评价算子,该算子在实验条件下能够实现传统聚焦评价算子的最佳聚焦位置搜索功能,且精度更高,为聚焦评价算法研究领域提供了一种新思路。且考虑到工业显微光学系统在有限的对焦范围内移动,导轨直线度误差较小,图像配准这一步往往可以省略。

参 考 文 献

- [1] Geng J. Structured-light 3D surface imaging: a tutorial[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2011, 3(2): 128-160.
- [2] Nayar S K, Nakagawa Y. Shape from focus[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1994, 16(8): 824-831.
- [3] Kammerud C, Abidi B, Abidi M. Computer vision algorithms for 3D reconstruction of microscopic data-a review[J]. *Microscopy and Microanalysis*, 2005, 11(S02): 636-637.
- [4] Kwon O J, Choi S, Jang D, et al. All-in-focus imaging using average filter-based relative focus measure[J]. *Digital Signal Processing*, 2017, 60: 200-210.
- [5] Shah M I, Mishra S, Sarkar M, et al. Identification of robust focus measure functions for the automated capturing of focused images from Ziehl-Neelsen stained sputum smear microscopy slide[J]. *Cytometry. Part A: the Journal of the International Society for Analytical Cytology*, 2017, 91(8): 800-809.
- [6] Jang H S, Muhammad M S, Choi T S. Optimizing image focus for shape from focus through locally weighted non-parametric regression[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 74393-74400.
- [7] Ali U, Lee I H, Mahmood M T. Guided image filtering in shape-from-focus: a comparative analysis[J]. *Pattern Recognition*, 2021, 111: 107670.
- [8] 张健浦,孙焕宇,王狮凌,等. 熔融石英光学元件亚表面缺陷三维重构技术[J]. *光学学报*, 2020, 40(2): 0216001.
Zhang J P, Sun H Y, Wang S L, et al. Three-dimensional reconstruction technology of subsurface defects in fused silica optical components[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(2): 0216001.
- [9] 王青青,陈平. 基于多聚焦图像序列融合的筒状类工件内壁形貌重构方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(10): 101002.
Wang Q Q, Chen P. Reconstruction method for inner wall morphology of cylindrical workpiece based on multi-focus image sequence fusion[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(10): 101002.
- [10] Lin H Y, Subbarao M. A vision system for fast 3D model reconstruction[C]//*Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. CVPR 2001, December 8-14, 2001, Kauai, HI, USA. New York: IEEE Press, 2001: 7177076.*
- [11] Sun Y, Duthaler S, Nelson B J. Autofocusing in

- computer microscopy: selecting the optimal focus algorithm[J]. *Microscopy Research and Technique*, 2004, 65(3): 139-149.
- [12] Alam M S, Iftakharuddin K M, Karim M A. Polarization-encoded optical shadow casting: edge detection using Roberts operator[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 1993, 6(3): 190-193.
- [13] Thelen A, Frey S, Hirsch S, et al. Improvements in shape-from-focus for holographic reconstructions with regard to focus operators, neighborhood-size, and height value interpolation[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2009, 18(1): 151-157.
- [14] Geusebroek J M, Cornelissen F, Smeulders A W M, et al. Robust autofocusing in microscopy[J]. *Cytometry*, 2000, 39(1): 1-9.
- [15] Pertuz S, Puig D, Garcia M A, et al. Generation of all-in-focus images by noise-robust selective fusion of limited depth-of-field images[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2013, 22(3): 1242-1251.
- [16] 汤春明, 刘玉翠, 于翔. 一种用于全息图自动重建的聚焦评价方法[J]. *光学学报*, 2014, 34(8): 0809001.
Tang C M, Liu Y C, Yu X. A focusing criterion function for automatic reconstruction of digital holograms[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(8): 0809001.