

# 余弦变换与拉普拉斯算子结合的聚焦评价方法

王秀峰, 孙小伟\*, 王加科, 高旭, 杨航

长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

**摘要** 聚焦评价是根据离焦序列图像搜索并获得最优像点位置的数值分析方法,其分辨力直接决定三维聚焦形貌恢复技术的重建精度。以空域拉普拉斯算子与频域离散余弦变换为基础,提出一种联合二者聚焦评价结果的高分辨力聚焦评价方法。首先,使用离散余弦变换算子对图像进行聚焦评价,将拉普拉斯算子聚焦评价值对称变换的结果作为权重因子;然后,使用权重因子对离散余弦变换评价值进行修正,以增强对图像聚焦特征的响应,抑制对图像离焦特征的响应;再次,通过分析离焦光学系统,采用计算离焦点扩展函数的方法生成离焦序列图像,仿真验证了该方法的有效性;最后,使用不同成像镜头及成像目标,搭建了不同离焦场景的实验平台,利用所提聚焦方法及传统的 5 种典型方法对采集到的离焦序列图像进行了聚焦对比分析。结果表明:所提聚焦评价方法在小离焦和大离焦图像中均能表现出优良的评价结果,且峰值灵敏度和陡峭度均明显得到提高。所提方法具有更优的聚焦评价分辨力及响应灵敏度,可有效提高三维聚焦形貌恢复精度。

**关键词** 图像处理; 聚焦评价; 余弦变换; 拉普拉斯变换; 点扩展函数

中图分类号 TP751.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.2410005

## Focus Measure Operator Combining Cosine Transform and Laplacian Operator

Wang Xiufeng, Sun Xiaowei\*, Wang Jiake, Gao Xu, Yang Hang

College of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

**Abstract** Focus evaluation is a numerical analysis method that searches and obtains the optimal image point position based on the defocus sequence images. Its resolution directly determines the reconstruction accuracy of the three-dimensional focus shape restoration technology. This paper proposes a high-resolution focus evaluation method that combines the focus evaluation results of the two methods based on the spatial Laplacian operator and frequency domain discrete cosine transform. First, the discrete cosine transform operator was used to perform focus evaluation on the images. Moreover, the result of the symmetric transformation of the Laplacian operator focus evaluation value was used as the weighting factor. The weighting factor was then used to correct the discrete cosine transform evaluation value to increase the response to the image focus feature and suppress the response to the image defocus feature. By analyzing the defocus optical system, the defocus sequence images were generated by method of calculating the defocus point spread function, and the effectiveness of this method was validated by simulation. Finally, an experimental platform for various defocusing scenes was constructed using various imaging lenses and targets. The proposed focus method and the five traditional typical methods were used to compare and analyze the focus of the acquired defocus sequence images. The results show that the proposed focus evaluation method can achieve excellent evaluation results in both small and large defocus images, and the peak sensitivity and steepness are significantly improved. The proposed method has better resolution and response sensitivity of focus evaluation and can effectively improve the accuracy of three-dimensional focus profile restoration.

收稿日期: 2020-12-28; 修回日期: 2021-01-05; 录用日期: 2021-03-08

基金项目: 国家自然科学基金(51505078)、吉林省科技厅优秀青年人才基金(20180520187JH)

通信作者: \*sxwlux@163.com

**Key words** image processing; focus measure operator; cosine transform; Laplacian transform; point spread function

**OCIS codes** 100.2000; 110.1758; 200.4740

## 1 引言

在成像系统中,实际并不能保证平面探测器上获得的图像中所有像点都是最优的共轭像。随着光电探测器与图像处理技术的发展,人们可以通过物面扫描或像面扫描的方式得到离焦图像序列,并利用图像的数值分析技术,计算出最优像点在图像序列中的位置。如果物像共轭关系明确,那么就可以计算逐个最优像点的位置,进而反演获得高精度的三维目标形貌数据。评估每个最优像点在图像序列中位置的数值计算过程称为聚焦评价。聚焦评价函数的分辨力和准确度决定了聚焦形貌恢复的重建精度和正确率。因此,研究高分辨力、高准确度的聚焦评价方法对提高三维聚焦形貌恢复精度具有重要理论意义和工程价值,而且高分辨力、高准确度的聚焦评价函数是图像自动调焦的关键<sup>[1]</sup>。

聚焦图像一般细节清晰,梯度幅值也相对较大,在频域表现为高频分量丰富。而离焦图像则较模糊,梯度幅值较小,在频域表现为高频分量较少。大致从灰度差分、统计、频域 3 个角度研究当前国内外的聚焦评价方法。灰度差分一般根据图像灰度值的一阶差分或二阶差分判断图像聚焦位置,运用的函数有梯度平方和函数(GEN)<sup>[2]</sup>、修改的拉普拉斯算子(SML)<sup>[3-4]</sup>、Tenengrad 函数、Brenner 函数<sup>[5]</sup>和 Roberts 函数<sup>[6]</sup>等,灰度差分的普遍优点是计算简单、实现容易,具有一定的鲁棒性,但在低对比度图像中,鉴于图像灰度差分值较小,其评价性能较差。基于统计的聚焦评价方法主要根据图像灰度值的统计规律判断图像是否聚焦,运用的函数有方差函数(GLV)<sup>[7-8]</sup>、能量方差函数<sup>[9]</sup>,由于低对比度图像灰度方差小,灵敏度也较低。基于频域的评价方法主要包括傅里叶变换<sup>[10-11]</sup>、小波系数和(SWAV)<sup>[12-13]</sup>、离散余弦变换(DCT)<sup>[14]</sup>等,利用图像的高频系数确定是否聚焦,故灵敏度高,且在低对比度图像中仍能得到优良的评价结果,鲁棒性强,但计算量大,计算效率低。因此,科研人员为寻找在不同场景均适合的聚焦方法,常常结合多个角度进行考虑。李惠光等<sup>[15]</sup>通过求和的方法融合改进的 SUSAN 算子与小波变换算子,定义了新的聚焦评价方法,该方法的准确度相比于单一方法高,但聚

焦分辨力低。郑馨等<sup>[16]</sup>提出了一种基于全局和局部灰度变化的显微图像聚焦评价方法(VarGrad),该方法在细节缺失的显微图像中效果较好,但不适用于复杂离焦场景的图像分析。谭伟等<sup>[17]</sup>结合灰度梯度函数与灰度标准差设计了新的聚焦评价函数,将其应用于遥感卫星图像,表现出较强的鲁棒性。

综上,单一聚焦评价方法很难对普遍场景离焦图像进行准确评价,并且改进的聚焦评价方法的分辨力较低,限制了聚焦形貌恢复技术的纵向重建精度。鉴于单一聚焦评价方法的局限性,考虑结合空域方法与频域聚焦评价方法的优点,提出一种将空域拉普拉斯算子与频域离散余弦变换融合的聚焦评价方法(SML-DCT),并详细给出了该方法的构建原理与实现过程。从仿真分析与实验测试两方面,开展了 SML-DCT 与 GEN、GLV、SWAV、SML、DCT 共 5 种典型聚焦评价方法的对比分析。结果表明:SML-DCT 是一种有效的聚焦评价方法,相比于传统方法,其评价曲线的峰值灵敏度和陡峭度均明显得到提高,表现出明显的单峰型,具有最高的聚焦评价分辨力。

## 2 SML-DCT 聚焦评价方法

假设离焦序列图像中共有  $p$  帧离焦图像,第  $t$  帧离焦图像在像素点  $(x, y)$  处的灰度值为  $I(x, y, t)$ 。在像素点  $(x, y)$  邻域选择大小为  $N \times N$  ( $N$  为大于 2 的奇数)的图像子窗口,则第  $t$  帧离焦图像  $I$  在像素点  $(x, y)$  处的聚焦评价价值  $M(x, y, t)$  为

$$M(x, y, t) = \frac{D(x, y, t)}{Q(x, y, t)}, \quad (1)$$

式中: $D(x, y, t)$  表示采用 DCT 计算得到的第  $t$  帧图像在像素点  $(x, y)$  处的聚焦评价价值; $Q(x, y, t)$  表示对  $D(x, y, t)$  进行修正的权重因子。 $Q(x, y, t)$  的计算方法为

$$Q(x, y, t) = \max_{t \in [1, p]} L(x, y, t) + \min_{t \in [1, p]} L(x, y, t) - L(x, y, t), \quad (2)$$

式中: $L(x, y, t)$  表示采用 SML 计算得到的第  $t$  帧图像在像素点  $(x, y)$  处的聚焦评价价值。

第  $t$  帧图像在  $(x, y)$  处的聚焦评价价值的修正权重因子  $Q(x, y, t)$  是拉普拉斯评价价值曲线延其中值

线对称变换的结果,曲线如图1所示。由图1可知,

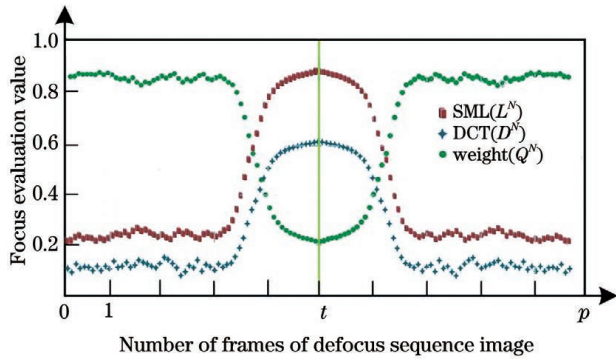


图 1 聚焦评价曲线

Fig. 1 Focus evaluation curve

修正因子的曲线变化趋势与实际聚焦评价曲线相反,即越接近聚焦位置时,修正因子  $Q^N$  越小。在聚焦位置,  $D^N$  值最大而  $Q^N$  值最小,进行除法运算相当于放大聚焦位置的评价响应;在离焦区域,  $D^N$  值较小而  $Q^N$  值较大,进行除法运算相当于抑制离焦区域的评价响应。显然,修正后的聚焦评价结果必将优于单一方法。

由于不同像素点的灰度值不同,(1)式计算得到的聚焦评价曲线在不同像素点上具有不同的变化尺度,所以需要每个像素点沿序列方向进行数据归一化处理,保证聚焦评价结果取值在  $[0, 1]$  区间上,归一化公式为

$$\bar{M}(x, y, t) = \frac{M(x, y, t) - \max_{t \in [1, p]} [M(x, y, t)]}{\max_{t \in [1, p]} [M(x, y, t)] - \min_{t \in [1, p]} [M(x, y, t)]} \quad (3)$$

上述理论设计的聚焦评价方法的具体计算流程如图 2 所示,聚焦评价方法的计算步骤为

1) 基于离焦序列图像  $I(x, y, t)$ ,使用 DCT 计算离焦序列图像中每幅图像的聚焦评价价值  $D(x, y, t)$ ,并根据(3)式进行归一化;

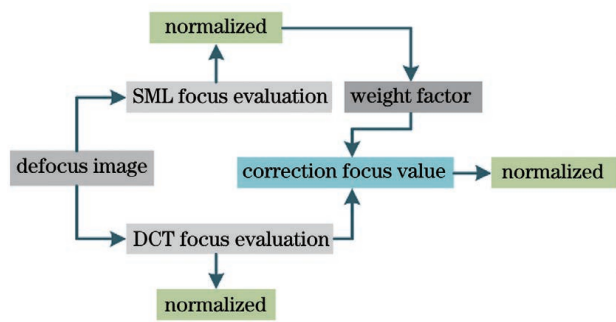


图 2 聚焦评价方法实现框图

Fig. 2 Implementation block diagram of focus evaluation method

2) 使用 SML 计算序列图像中每幅离焦图像的聚焦评价价值  $L(x, y, t)$ ,并根据(3)式进行归一化;

3) 根据(2)式确定修正权重因子  $Q(x, y, t)$ ;

4) 根据(1)式计算得到第  $t$  帧图像在像素点  $(x, y)$  处的聚焦评价价值  $M(x, y, t)$ ;

5) 根据(3)式对计算结果进行归一化,得到最终的评价结果  $\bar{M}(x, y, t)$ 。

### 3 比对评价函数和比对指标

#### 3.1 比对评价函数

为分析所构建评价函数的性能,在基于空域的评价方法中选择灰度差分平方和函数,在基于统计的评价方法中选择方差函数,在基于频域的评价函数中选择小波系数和,与拉普拉斯算子、离散余弦变换方法共 5 种作为比对方法。

1) 梯度平方和函数

$$M(x, y, t) = \sum_{(i, j, t) \in \Omega(x, y, t)} [I_x(i, j, t)^2 + I_y(i, j, t)^2], \quad (4)$$

式中:  $I_x(i, j, t) = I(i+1, j, t) - I(i, j, t)$ ,  $I_y(i, j, t) = I(i, j+1, t) - I(i, j, t)$ ;  $\Omega(x, y, t)$  表示第  $t$  帧图像在像素  $(x, y)$  处的邻域窗口图像,它的大小为  $N \times N$ 。

2) 方差函数

$$M(x, y, t) = \sum_{(i, j, t) \in \Omega(x, y, t)} [I(i, j, t) - \mu_{\Omega}(x, y, t)], \quad (5)$$

式中:  $\mu_{\Omega}(x, y, t) = \frac{1}{N^2} \sum_{(i, j, t) \in \Omega(x, y, t)} I(i, j, t)$ 。

3) 小波变换系数和

$$M(x, y, t) = \sum_{(i, j, t) \in \Omega(x, y, t)} |W_{LH1}(i, j, t)| + |W_{HL1}(i, j, t)| + |W_{HH1}(i, j, t)|. \quad (6)$$

4) 离散余弦变换

基于频域的 DCT 聚焦评价方法被广泛应用在图像模糊分割中,用余弦变换系数的结果表示图像的高频信息量。为提高聚焦评价响应灵敏度,对传统离散

余弦变换方法进行修改,将图像离散余弦变换系数作平方处理。在  $N \times N$  窗口下,用 DCT 计算第  $t$  帧离焦图像在像素  $(x, y)$  处的聚焦评价值。在图像序列中,聚焦评价峰值位置即为计算得到的聚焦位置。

$$D(x, y, t) = \sum_{u=0}^{N-1} \sum_{v=0}^{N-1} |S_{x,y}(u, v, t)|^2, u + v \geq N, \quad (7)$$

$$\text{式中: } S_{x,y}(u, v, t) = \frac{1}{4} C_u C_v \sum_{(i,j,t) \in \Omega(x,y,t)} I(i, j, t) \cos \left[ \frac{(2i+1)u\pi}{2N} \right] \cos \left[ \frac{(2j+1)v\pi}{2N} \right], C_i = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}}, & i=0 \\ 1, & i \neq 0 \end{cases}, C_j = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}}, & j=0 \\ 1, & j \neq 0 \end{cases}.$$

5) 拉普拉斯算子

基于空域的 SML 聚焦评价方法被用在聚焦形貌恢复技术,用来寻找像素的准确聚焦位置。用图像灰度值的二阶差分替代图像拉普拉斯变换,反映图像灰度的变化能力。在  $N \times N$  窗口下,用 SML 计算第  $t$  帧离焦图像在像素  $(x, y)$  处的聚焦评价值。

$$M(x, y, t) = \sum_{(i,j,t) \in \Omega(x,y,t)} [I_x(i, j, t)^2 + I_y(i, j, t)^2], \quad (8)$$

式中:  $L_{ML}(i, j, t)_x = |2I(i, j, t) - I(i - s_{step}, j, t) - I(i + s_{step}, j, t)|$ ,  $s_{step}$  为计算步长;  $L_{ML}(i, j, t)_y = |2I(i, j, t) - I(i, j - s_{step}, t) - I(i, j + s_{step}, t)|$ ,  $L_{ML}$  表示图像的二阶差分。

3.2 比对指标

根据文献[18]的内容,选取峰值区域灵敏度  $S_e$  和陡峭度  $S_p$  两项主要指标对聚焦评价方法性能进行评估。峰值区域灵敏度表征聚焦评价曲线峰值附近变化的剧烈程度,在微小位移离焦的过程中,其值越大,聚焦评价的准确度越高。评价曲线陡峭度用来表征聚焦评价函数对于不同离焦程度图像的分辨能力,其值越大,则表示聚焦评价函数的分辨力越高。它们的计算方法分别为

$$S_e = \frac{M_{\max}(t) - M(t-1)}{M(t-1)}, \quad (9)$$

$$S_p = \frac{2M_{\max}(t) - M_{\min,l}(t_1) - M_{\min,r}(t_2)}{t_2 - t_1}, \quad (10)$$

式中:  $M_{\max}(t)$  表示最大聚焦评价值,且该帧序列位置为  $t$ ;  $M(t-1)$  表示最大聚焦评价值后一帧对应像点的聚焦评价值;  $S_p$  指标用于高于某一阈值能够在序列方向上形成单峰渐变聚焦评价曲线的分析,计算中取固定阈值为 0.1;  $M_{\min,l}(t_1)$  表示峰值左侧大于 0.1 阈值的最小聚焦评价值,且其在序列中索引值为  $t_1$ ;  $M_{\min,r}(t_2)$  表示峰值右侧大于 0.1 阈值的最小聚焦评价值,且其在序列中索引值为  $t_2$ 。

4 仿真验证

通过计算显微系统离焦点扩展函数与理想物方模型的卷积模拟生成离焦序列图像,使用所提方法及传统方法对离焦图像进行聚焦评价,最后使用峰值灵敏度及陡峭度对聚焦评价方法进行定量分析。

4.1 仿真离焦图像计算

仿真实验构建了具有阶梯高度差信息的三种目标模型,以下采样的方式产生物方点目标图像  $I_f$ , 图像大小为  $256 \times 256$ , 并模拟物方景深扫描过程,利用点扩展函数计算对应的序列图像数据  $I_d$ , 得到离焦图像序列的卷积方程<sup>[19]</sup>为

$$I_d(z) = h(z) \otimes I_f, \quad (11)$$

式中:  $h(z)$  表示离焦距离为  $z$  的离焦点扩展图像。

在高放大倍数和小散焦的情况下,系统的点扩展函数可以近似表达为

$$\begin{cases} H(z, q) = \frac{1}{\pi} (2\beta - \sin 2\beta) \times \\ \text{jinc} \left[ 4kz \frac{NA^2}{2} \left( 1 - \frac{|q|}{f_c} \right) \frac{q}{f_c} \right], \\ h(z) = \mathcal{F}^{-1} \{ H(z, q) \} \end{cases}, \quad (12)$$

式中参数的描述如表 1 所示。

表 1 参数定义与描述

Table 1 Parameter definitions and description

Symbol	Description	Formula
$\lambda$	Wavelength	
$NA$	Numerical aperture	
$k$	Wave number	$k = 2\pi/\lambda$
$f_c$	System cut-off frequency	$f_c = 2NA/\lambda$
$q$	Radial spatial frequency	$q = \sqrt{u^2 + v^2}, u, v \in [-f_c, f_c]$
$jinc(x)$		$jinc(x) = 2J_1(x)/x$
$\beta$		$\beta = \arccos(q/f_c)$
$z$	Defocus distance of the object plane	

为检验算法对不同图像内容的适应性,仿真实验中分别设计了如图 3 所示的 Circle、Trapezoid 和 Bar 三个模型,每个模型均包含四个阶梯布置的目

标(o1,o2,o3,o4),从背景平面开始,各目标的高度依次递增 0.5  $\mu\text{m}$ 。

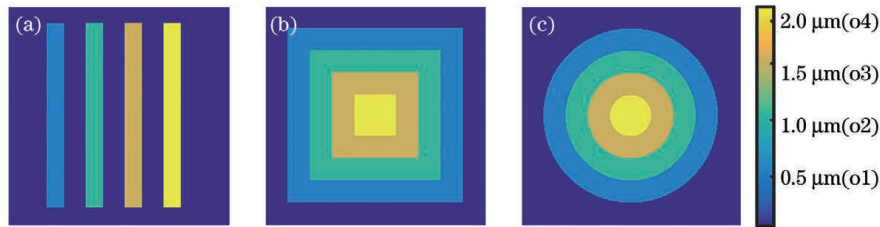


图 3 仿真物方模型图。(a)Bar;(b)Trapezoid;(c)Circle

Fig. 3 Figures of object model. (a) Bar; (b) Trapezoid; (c) Circle

扫描成像的光学模型如图 4 所示。物体平面中四个不同高度目标分别位于不同的物平面离焦位

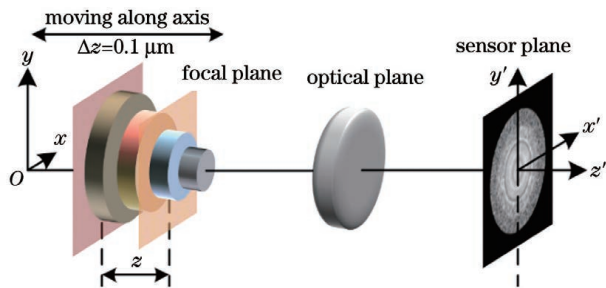


图 4 物方扫描成像原理

Fig. 4 Object scanning imaging model

置,它们与对应离焦位置处的点扩展函数进行卷积,将得到四个目标在像面形成的四幅离焦图像;将四幅离焦图像线性叠加并归一化,得到当前位置物方所有目标在传感器平面形成的离焦图像。

仿真计算中设显微系统数值孔径  $NA = 1.2$ ,波长  $\lambda = 0.55 \mu\text{m}$ 。为使离焦序列图像包含每个目标从离焦-聚焦-离焦的过程,仿真实验中对距离参考平面  $0 \sim 2.1 \mu\text{m}$  的范围进行模拟离焦,即  $z \in [0, 2.1 \mu\text{m}]$ ,离焦间隔为  $\Delta z = 0.1 \mu\text{m}$ 。对三个模型进行计算,分别得到包含所有目标离焦过程的 22 帧序列离焦图像,如图 5 所示,单幅离焦图像的大小为  $256 \times 256$ 。

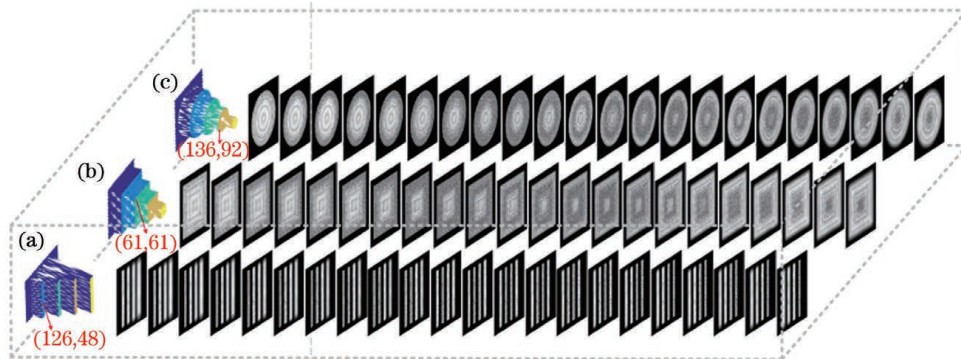


图 5 仿真离焦序列图像。(a)Bar;(b)Trapezoid;(c)Circle

Fig. 5 Simulated defocused sequence images. (a) Bar; (b) Trapezoid; (c) Circle

### 4.2 仿真结果分析

分别选取 Circle、Trapezoid 和 Bar 三个目标上的点进行处理,它们的坐标分别为 A(136,92)(o1 表面上)、B(61,61)(o2 表面上)、C(126,48)(o3 表面上),如图 5 所示。计算并绘制它们的聚焦评价曲线,如图 6 所示,横坐标为像素离焦位置,纵坐标为归一化后对应像素点的聚焦评价值。由图 6 可知: GEN、GLV、SWAV、SML、DCT 与所提方法计算得

到的聚焦评价曲线均表现出明显的单峰型和无偏性,符合聚焦评价曲线的特点;当离焦图像内容较复杂时,GLV 方法计算得到的聚焦评价曲线单峰型明显被破坏,得到了最差的评价结果。与其他 5 种方法相比,在聚焦区域,对图像聚焦特征的响应度最大,在离焦区域,计算得到的聚焦评价值接近于 0,表明所提方法能够极大地抑制图像中的离焦信息。

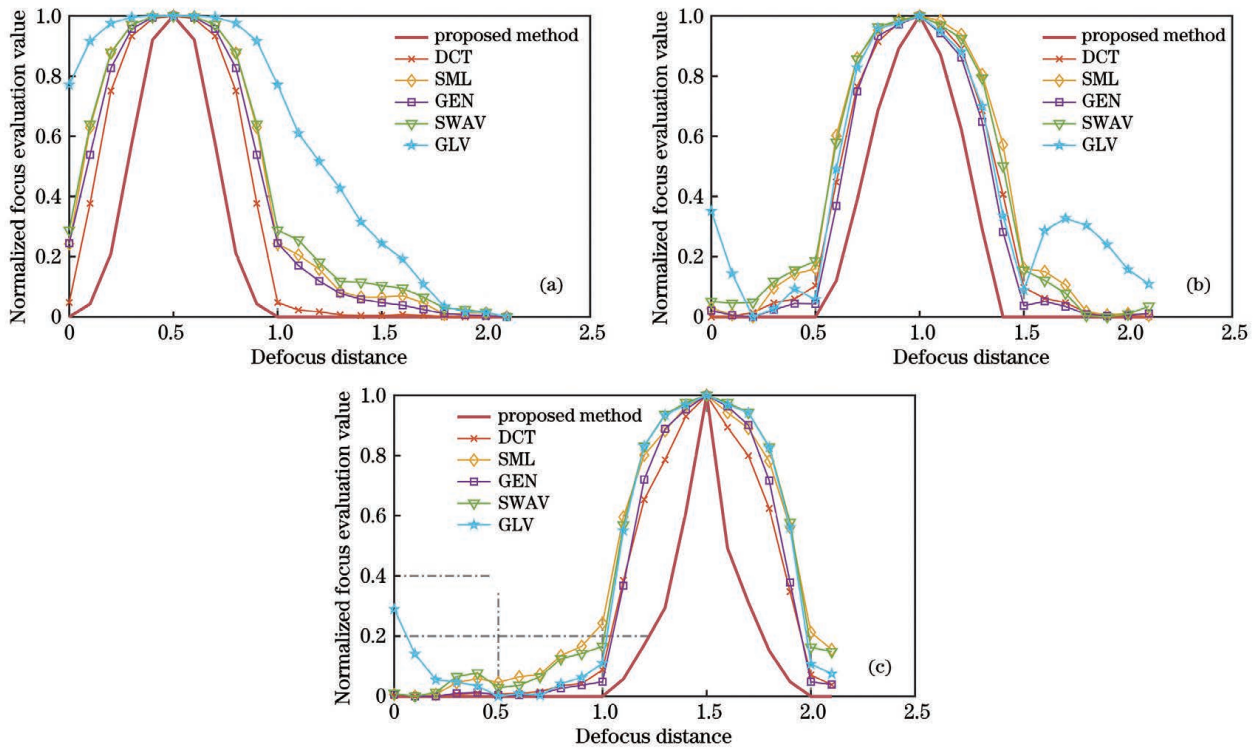


图 6 仿真聚焦评价曲线。(a) A(136,92);(b) B(61,61);(c) C(126,48)

Fig. 6 Simulated focus evaluation curves. (a) A (136, 92); (b) B (61, 61); (c) C(126, 48)

根据(9)、(10)式计算图 6 聚焦评价曲线的峰值灵敏度与陡峭度,得到表 2 的结果。由表 2 分析知:在仿真序列离焦图像中,所提方法在 A、B、C 三点中均得到了最大的聚焦评价曲线峰值灵敏度和陡峭度,峰值灵敏度分别比 GEN、GLV、SWAV、SML、

DCT 方法高 3.54 倍、2.61 倍、6.95 倍、4.89 倍、2.00 倍;陡峭度分别比 GEN、GLV、SWAV、SML、DCT 方法高 52%、87%、69%、71%、44%。说明相比其他 5 种方法,所提方法对图像离焦特征的抑制能力最强,具有最高的聚焦评价分辨率。

表 2 仿真离焦图像计算结果

Table 2 Calculation results of simulated defocus image

Method	$S_e$				$S_p$			
	A	B	C	Mean value	A	B	C	Mean value
GEN	0.005	0.061	0.038	0.035	1.51	1.86	1.90	1.76
GLV	0.047	0.055	0.032	0.044	0.66	1.85	1.78	1.43
SWAV	0.004	0.032	0.025	0.020	1.42	1.66	1.67	1.58
SML	0.003	0.017	0.061	0.027	1.51	1.68	1.54	1.57
DCT	0.009	0.031	0.119	0.053	1.90	1.80	1.84	1.85
Proposed method	0.086	0.148	0.245	0.159	2.63	2.27	3.11	2.67

## 5 实验

实验部分搭建不同离焦场景实验平台,同步采集离焦序列图像。使用所提方法与对比方法对离焦图像进行聚焦评价分析,通过聚焦评价曲线的峰值区域灵敏度  $S_s$  和陡峭度  $S_p$  对不同方法进行评估。

### 5.1 实验平台搭建及离焦图像获取

为进一步确定所提聚焦评价函数在实际场景中

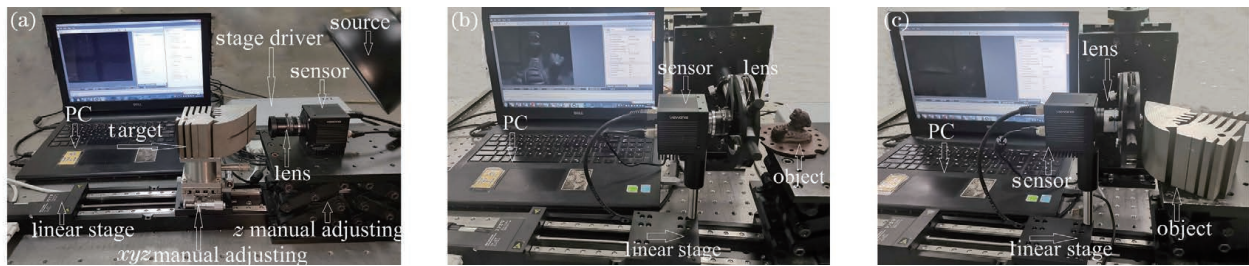


图 7 实验装置图。(a)成像镜头焦距  $f=8$  mm,目标扫描实验装置图;(b)成像镜头焦距  $f=8$  mm,探测器扫描实验装置图;(c)显微镜镜头  $NA=0.65$ ,探测器扫描实验装置图

Fig. 7 Figures of experimental device. (a) Target scanning experiment device figure with lens of  $f=8$  mm; (b) sensor scanning experiment device figure with lens of  $f=8$  mm; (c) sensor scanning experiment device figure with microscope lens of  $NA=0.65$

表 3 实验器件参数

Table 3 Device parameters used in the experiment

Device	Parameter	
Sensor	Company / Name	Vieworks / VH-310C
	Pixel size	$7.4 \mu\text{m} \times 7.4 \mu\text{m}$
	Active image size	$640 \times 480$
	Bit	12 bit, (0–4096)
Lens	Company	Computar
	Focal length	2.4–16 mm
	F-number	2.4
Microscope	Numerical aperture	0.65
	Magnification	40
Linear stage	Company / Name	PI / M-403.8DG
	Resolution	$0.5 \mu\text{m}$
	Travel range	200 mm

图 7(a)中选用背景单一且结构简单的粗糙铝材为成像目标,通过高精度位移平台带动其沿光轴等间隔移动的方式获得离焦序列图像,离焦图像的分辨率为  $640 \times 480$ 。由实际标定及计算可知,十字中心点(222,333)在物距为 15.5 mm(第 31 帧)时清晰成像,故取扫描距离  $z \in (0, 31.5 \text{ mm})$ ,步长  $\Delta z = 0.5 \text{ mm}$ ,共采集 63 帧离焦图像进行分析。部

的评价特性,搭建如图 7 所示的实验平台。分别通过图 7(a)物平面扫描、图 7(b)和图 7(c)传感器平面扫描、镜头变焦等方式采集背景、目标不同的离焦图像,使用所提方法进行聚焦评价计算,与传统典型方法进行对比分析。实验平台主要由 12 位 Vieworks-VH 系列工业相机、Computar 镜头、显微镜镜头、PI 线性位移平台和上位机组成。实验中所用各种器件的详细参数如表 3 所示。

分离焦图像如图 8(a)所示。

图 7(b)中选用结构复杂的物体作为成像目标,通过位移平台带动相机沿光轴移动的方式获得内容复杂的离焦图像。由实际标定及计算可知,点(380,310)约在像距为 8 mm(第 80 帧)时清晰成像,故取推扫距离  $z \in (2 \text{ mm}, 16 \text{ mm})$ ,步长  $\Delta z = 0.1 \text{ mm}$ ,共采集 140 帧离焦图像进行分析。部分离



图 8 部分离焦图像。(a)使用成像镜头,通过目标扫描的方式采集的离焦图像;(b)使用成像镜头,通过探测器扫描的方式采集的离焦图像;(c)使用显微镜头,通过探测器扫描的方式采集的离焦图像;(d)通过变焦方式采集的离焦图像

Fig. 8 Partial defocused images. (a) Defocused image obtained by moving the target under the imaging lens; (b) defocused image obtained by moving the sensor under the imaging lens; (c) defocus image obtained by moving the sensor under the microscope lens; (d) defocused images obtained through lens zoom

焦图像如图 8(b)所示。

图 7(c)中选用显微镜头,以粗糙的硬质铝材表面为成像目标,通过位移平台带动相机沿光轴移动的方式获得不同的离焦图像。扫描步长  $\Delta z = 0.01 \text{ mm}$ ,共采集 70 帧离焦图像,并选择图像中一点(290,240)进行分析。采集的部分序列图像如图 8(c)所示。

为验证所提方法对普通场景离焦图像的适用性,通过调节镜头焦距的方式,采集得到背景及目标均复杂的离焦图像。焦距调节的步长为  $0.2 \text{ mm}$ ,共采集 36 帧离焦图像,并选择图像中一点(180,90)进行分析。采集的部分离焦图像如图 8(d)所示。

## 5.2 实验结果分析

使用所提方法及传统方法计算离焦序列图像的聚焦评价,分别选择四组离焦图像中的一点 A(222,333)、B(380,310)、C(290,240)、D(180,90)进行分析,绘制的聚焦评价曲线如图 9 所示。

由图 9(a)知,在背景单一的图像中,各种聚焦评价方法均能准确定位聚焦位置,表现出较优的评价结果,但所提方法收敛速度更快,更容易确定聚焦位置。由图 9(b)知:在内容复杂的图像中,SML、

GEN、SWAV、DCT 四种方法的聚焦评价曲线均未在聚焦位置取得极大值,而且在离焦区域它们的波动较大,说明受图像内容影响,这 4 种方法不能准确地抑制图像离焦信息;所提方法在离焦区域的评价结果接近于零,在峰值区域能够准确定位聚焦位置,得到了优于其他方法的评价结果。由图 9(c)知:在微小离焦的显微系统中,GLV 的聚焦评价曲线出现多处峰值位置,不再适用;SML、GEN、SWAV、DCT 四种方法的聚焦评价曲线在峰值位置表现出不同程度的波动,在聚焦位置的附近帧也取得极大值或接近极大值的结果,说明这 4 种方法在小离焦情况下的分辨力低;而所提方法仍然能够快速收敛至聚焦位置,具有较高的聚焦评价分辨力。由图 9(d)知,在大离焦的普通场景图片中,除 GLV 的聚焦评价曲线出现多处峰值,其他方法均能准确定位聚焦位置,但在离焦区域,所提方法的评价结果接近于零,仍然优于其他方法。

根据(9)、(10)式计算图 9 中聚焦评价曲线的峰值灵敏度与陡峭度,得到表 4 的结果。由表 4 分析可知,在 4 组离焦图像序列中,所提方法聚焦评价曲线的峰值灵敏度和陡峭度均最大。具体的,所提方法的峰值灵敏度分别比 GEN、GLV、SWAV、SML、



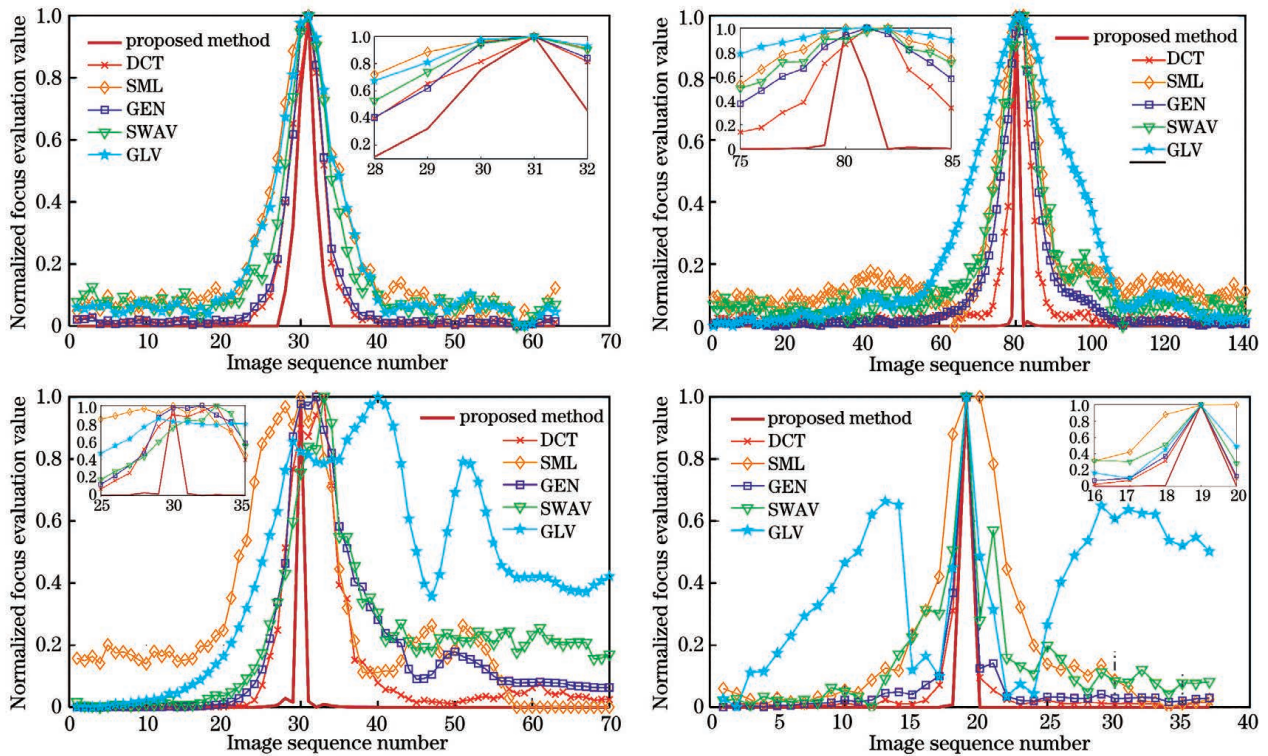


图 9 实验离焦图像聚焦评价曲线。(a) A(222,333);(b) B(380,310);(c) C(290,240);(d) D(180,90)

Fig. 9 Focus evaluation curves of experimental defocused image. (a) A(222,333); (b) B(380,310); (c) C(290,240); (d) D(180,90)

表 4 实验离焦图像计算结果

Table 4 Calculation results of experimental defocus image

Method	$S_e$				$S_p$			
	A	B	C	Mean value	A	B	C	Mean value
GEN	0.190	0.052	0.118	0.703	1.349	0.165	0.185	1.180
GLV	0.076	0.015		0.655	1.194	0.073		0.746
SWAV	0.106	0.209	0.091	0.557	1.228	0.122	0.161	0.355
SML	0.096	0.116	0.250	0.375	1.181	0.156	0.145	0.317
DCT	0.208	0.012	0.400	0.756	1.392	0.287	0.275	1.223
Proposed method	0.303	0.734	0.839	0.973	1.816	1.313	1.965	1.993

DCT 至少高 0.113、0.227、0.197、0.207、0.095，陡峭度分别比 GEN、GLV、SWAV、SML、DCT 至少高 0.467、0.622、0.588、0.635、0.424。说明所提方法在峰值附近的评价值变化最剧烈，能够快速收敛到聚焦位置，相比于传统方法，具有最灵敏的聚焦响应度和最大的聚焦分辨力。

对实验结果进行分析可知，针对不同情况的四组离焦序列图像，所提方法均得到了优于传统方法的结果，相比于传统方法，具有最高的峰值灵敏度和陡峭度，表明所提方法具有一定的普适性。

## 6 结 论

在分析传统聚焦评价算子的基础上，构建了新的聚焦评价函数，并通过仿真分析与实验测试验证了函数指标性能，对比性地给出相关特性数据。从数据结果可知，所提方法能够极大地增加聚焦评价曲线峰值区域灵敏度，有利于像点位置的精确提取，对高精度目标形貌恢复工作具有重要促进作用；曲线的陡峭度也优于比对的 5 种聚焦评价方法，相同阈值下，序列宽度均小于其他方法，聚焦评价曲线上

升与下降基本呈直线型,这将有益于高速自动调焦系统扫描过程的优化与扫描步长的减小。并且,高分辨力的聚焦评价函数能够被广泛应用于自动调焦和图像模糊分割中。

## 参 考 文 献

- [1] Zong G H, Sun M L, Bi S S, et al. Research on autofocus technique in micro-vision[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(9): 1225-1232.  
宗光华, 孙明磊, 毕树生, 等. 显微视觉自动聚焦研究[J]. *光学学报*, 2005, 25(9): 1225-1232.
- [2] Subbarao M, Choi T S, Nikzad A. Focusing techniques[J]. *Optical Engineering*, 1999, 32(11): 2824-2836.
- [3] Nayar S K, Nakagawa Y. Shape from focus [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1994, 16(8): 824-831.
- [4] Li L H, Zhang M L. Research of focusing evaluation function under a strong shot-noise background [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(11): 111103.  
李丽宏, 张明路. 强散粒噪声下聚焦评价函数的研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(11): 111103.
- [5] Xu B H, Jiang H P. An auto-focus algorithm based on fine and rough adjustment for visual optical measurement imaging system of shooting range [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 47(12): 121203.  
徐博泓, 江和平. 一种粗精结合的图像式靶场测量系统自动调焦算法 [J]. *激光与光电子学进展*, 2010, 47(12): 121203.
- [6] Gao Z, Jiang W, Zhu K F, et al. Auto-focusing algorithm based on Roberts gradient [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(1): 117-121.  
高赞, 姜威, 朱孔凤, 等. 基于 Roberts 梯度的自动聚焦算法 [J]. *红外与激光工程*, 2006, 35(1): 117-121.
- [7] Pech-Pacheco J L, Cristobal G, Chamorro-Martinez J, et al. Diatom autofocusing in brightfield microscopy: a comparative study [C] // *Proceedings 15th International Conference on Pattern Recognition*, September 3-7, 2000, Barcelona, Spain. New York: IEEE Press, 2000: 314-317.
- [8] 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.  
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.
- [9] Zhao H, Bao G T, Tao W. Experimental research and analysis of automatic focusing function for imaging measurement [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004, 12(5): 531-536.  
赵辉, 鲍歌堂, 陶卫. 图像测量中自动调焦函数的实验研究与分析 [J]. *光学精密工程*, 2004, 12(5): 531-536.
- [10] Zhu A B, Hu H Q, He D Y, et al. Three-dimensional reconstruction of tool wear area for grinding wheel using frequency-domain fusion method [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2015, 49(5): 82-86, 133.  
朱爱斌, 胡浩强, 何大勇, 等. 采用频域融合方法的砂轮刀具磨损三维重构技术 [J]. *西安交通大学学报*, 2015, 49(5): 82-86, 133.
- [11] Hilsenstein V. Robust autofocusing for automated microscopy imaging of fluorescently labelled bacteria [C] // *Digital Image Computing: Techniques and Applications (DICTA'05)*, December 6-8, 2005, Queensland, Australia. New York: IEEE Press, 2005: 15.
- [12] Xue K, Li Q, Wang Q. Automatic focusing algorithm of terahertz digital holographic imaging based on wavelet transform [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(6): s111005.  
薛凯, 李琦, 王骥. 基于小波变换的太赫兹数字全息成像自动聚焦算法 [J]. *中国激光*, 2012, 39(6): s111005.
- [13] Yang G, Nelson B J. Wavelet-based autofocusing and unsupervised segmentation of microscopic images [C] // *Proceedings 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2003)*, October 27-31, 2003, Las Vegas, NV, USA. New York: IEEE Press, 2003: 2143-2148.
- [14] Lee S Y, Yoo J T, Kumar Y, et al. Reduced energy-ratio measure for robust autofocusing in digital camera [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2009, 16(2): 133-136.
- [15] Li H G, Li M, Yuan R H, et al. Auto-focusing and control of large range micro-vision system [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2016, 43(9): 9-13.  
李惠光, 李敏, 袁仁辉, 等. 显微视觉系统大范围自动聚焦及控制 [J]. *光电工程*, 2016, 43(9): 9-13.
- [16] 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.
- [17] Tan W, Qi W W, He H Y, et al. An on-board

- autofocusing method for scanning agile remote sensing satellite [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(5): 0528002.
- 谭伟, 齐文雯, 何红艳, 等. 一种推扫型敏捷遥感卫星上自动调焦技术 [J]. *光学学报*, 2020, 40(5): 0528002.
- [18] 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.
- [19] Castleman K R. *Digital image processing* [M]. Zhu Z G, Lin X X, Shi D J, et al., Transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002.
- Castleman K R. *数字图像处理* [M]. 朱志刚, 林学刚, 石定机, 等, 译. 北京: 电子工业出版社, 2002.