

# 一种用于全息图自动重建的聚焦评价方法

汤春明<sup>1,2</sup> 刘玉翠<sup>1</sup> 于翔<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 哈尔滨工程大学信息与通信工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001  
<sup>2</sup> 天津工业大学电子与信息工程学院, 天津 300387  
<sup>3</sup> 天津工业大学工程教学实习训练中心, 天津 300387

**摘要** 自动聚焦是数字全息技术中实现自动重建的关键技术之一,而自动聚焦的关键是寻找性能可靠的聚焦评价函数。通过对现有聚焦评价函数的深入研究分析,及对图像清晰度相关理论的学习,面向海洋生物全息图提出了一种新的聚焦评价函数,该聚焦评价函数的依据是局部标准差分布能够反映图像细节信息的特性及标准差自身具有较高稳健性的特征,以标准差作为离散程度度量,将全息图重建像细节的离散程度作为其清晰度指标,并将清晰度最大值对应的重建距离作为最佳重建距离,以此完成自动聚焦。实验结果表明:与其他聚焦评价函数相比,该方法具有较好的单峰性、较高的灵敏度和信噪比(SNR)及较好的无偏性等性能,且对于海洋生物全息图具有较强的实用性和通用性。因此,该方法可以满足海洋生物全息图自动重建的需求。

**关键词** 图像处理;聚焦评价函数;局部方差分布;自动聚焦;海洋生物全息图

**中图分类号** TN26; TN911.73 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0809001

## A Focusing Criterion Function for Automatic Reconstruction of Digital Holograms

Tang Chunming<sup>1,2</sup> Liu Yucui<sup>1</sup> Yu Xiang<sup>3</sup>

<sup>1</sup> College of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China

<sup>2</sup> College of Electronic and Information Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China

<sup>3</sup> Engineering Teaching Training Center, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China

**Abstract** The autofocus is a key technique for automatic reconstruction in digital holography, and the performance of the focusing criterion function influences the effect of the autofocus greatly. After analyzing and researching existing focusing criterion functions and studying the theories about image definition, for the digital holograms of marine microorganism, a new focusing criterion function is proposed. The method proposed is based on features that local standard deviation distribution is able to reflect image detail information and standard deviation which is taken as measurement of discrete degree has high robustness. It makes the discrete degree of reconstruction image detail as image definition index, and makes reconstruction distance corresponding to maximum of the definition as the best distance to accomplish the autofocus. Simulation results illustrate that compared with the existing methods, the proposed method has the stronger single peak, higher sensibility and signal to noise ratio (SNR) and better unbiasedness. In addition, it has strong universal and practical for the digital holograms of marine microorganism. So it can satisfy the requirements of automatic reconstruction of the marine microorganism holograms.

**Key words** image processing; focusing criterion function; local standard deviation distribution; autofocus; marine microorganism holograms

**OCIS codes** 090.1995; 090.6186; 090.1000; 090.1760; 100.2000; 100.2650

**收稿日期**: 2014-02-12; **收到修改稿日期**: 2014-03-24

**作者简介**: 汤春明(1971—),女,教授,博士生导师,主要从事图像处理、目标识别与追踪、数据处理与信息挖掘和网络安全检测等方面的研究。E-mail: tangchunming@hrbeu.edu.cn

# 1 引 言

随着计算机和 CCD 技术的发展,光学全息技术和数字全息技术在海洋浮游动物(水母,环节类微生物,幼型纲等)及粒子的研究与应用中占据越来越重要的地位<sup>[1]</sup>,其中自动聚焦是该项技术实现自动重建的重要问题之一<sup>[2]</sup>。自动聚焦是指自动确定聚焦距离(FD,  $L_{FD}$ ),  $L_{FD}$ 是指物光场到 CCD 记录光场的光径长度(即光经历的路程长度),重建目标只有在其  $L_{FD}$ 处重建才会清晰,否则重建像会严重退化而出现离焦现象。而具有清晰度判断功能的函数即为聚焦评价函数(FCF),又称清晰度评价函数<sup>[3]</sup>。因此要想实现自动聚焦就要有好的 FCF。

FCF 是根据目标的某种特性,例如边缘锐度,统计特性等,随 FD 的变化情况建立起来的一种聚焦判据准则。经典的 FCF 主要分为两大类:空域法,例如梯度方法灰度方差法<sup>[2-6]</sup>,自相关函数法<sup>[4-11]</sup>,图像信息熵法<sup>[5-6,12]</sup>等;频域法,例如小波法<sup>[6,8,13-15]</sup>,稀疏菲涅耳类小波法<sup>[16]</sup>,傅里叶变换法<sup>[17]</sup>,余弦变换法<sup>[18]</sup>等。频域法利用了细节的频域特性,灵敏度和单峰性较好<sup>[5-6]</sup>,但这类 FCF 比较费时,对实现实时性不利。图像信息熵法利用了图像数据的概率分布特性,图像越清晰,图像信息熵越大或越小<sup>[12]</sup>,但用作 FCF 不太理想<sup>[5]</sup>。灰度方差法和自相关函数法利用的是图像数据的统计特性,图像越清晰,灰度方差越大,自相关性越小,但后者要比前者运行时间长很多。基于梯度的 FCF,利用的目标的边缘锐度特性,越是接近  $L_{FD}$ ,重建像越清晰,目标边缘特性越突出,其中, Tenegrad 表现出更突出的优越性<sup>[6]</sup>。但用对于全息图自动聚焦效果不太理想。

随着数字全息技术的广泛应用,国外学者们相继提出了新的 FCF。文献[2]提出了梯度方差法(SOG),其准确度较高,但因涉及到小波变换而比较费时。文献[3]提出的 Contrast 法,方法简单且易实现,但其实用性有待考证。文献[19]提出了幅度积分法(SOA),其操作简单且对纯相位和纯振幅目标效果较好。文献[20]针对粒子场全息图提出了边缘对比度和边缘亮度跳法,并在文献[21]中与其他的方法进行比较。此外文献[22]提出利用相位差分建立 FCF 等,相位重建是个复杂的过程,这种方法不利于实时性的实现。

通过对现有 FCF 的探讨发现,上述提到的 FCF 各有优点和应用领域,但对海洋生物全息图通用性不强,即同一种 FCF 不能对所有的全息图生效。本

文针对这一问题深入研究了局部标准差分布相关理论及其应用的基础上,结合 FCF 的建立准则提出了一种基于局部方差的聚焦评价函数(SDLSD),以期获得一种性能良好且具有较好实用性和通用性的聚焦评价函数。

## 2 基于局部标准差的 FCF

### 2.1 局部标准差 LSD 的介绍及理论分析

在数学上,标准差被定义为总体各单位标准值与其平均数离差平方的算术平均数的平方根,通常用  $\sigma$  表示。标准差是一组数据平均值分散程度的一种度量。一个较大的标准差代表大部分数值和其平均值之间差异较大,即数据越离散;一个较小的标准差,代表这些数值较接近平均值,即数据越集中。假设有一组数值  $\{x_i\}$  (皆为实数),其平均值为  $\mu$ ,则标准差为

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}. \quad (1)$$

在图像领域,图像越清晰,对比度越大,灰度值分布越分散,其标准差越大。对于一幅图像,非细节区域灰度分布较为平坦,即灰度值较为集中,按照标准差定义,其标准差较小;而细节周围则相反,对应的标准差较大。

从生理学的角度,人眼对图像的高频分量比较敏感,而高频分量主要体现为图像的细节,因而图像的局部标准差分布(LSDD)能够较好地描述图像的细节信息,因此可以将图像的 LSDD 作为分析图像内容信息的一种方法,或者也可以认为图像的 LSDD 分布包含了图像的某些重要结构信息<sup>[23-24]</sup>。

### 2.2 SDLSD 的提出

文献[2]提出的梯度标准差法,利用梯度体现目标边缘锐度的特性(细节信息),通过求解边缘锐度的离散程度获得图像的清晰度程度。梯度算子易受噪声的影响,因此稳健性较低,通用性欠佳<sup>[15]</sup>。灰度方差法对整幅图像操作,在抑制噪声的同时也大大降低了对细节变化的表现能力,特别是在目标相对较小时,甚至不能体现图像清晰度的变化。

为了改善梯度方差稳健性相对较低和通用性不强的缺陷及灰度方差法的过平均现象,引入 LSDD 作为图像细节信息的表述,然后求其 LSDD 的标准差作为 FCF 值,记作 SDLSD 公式描述为

$$F_{SLS} = \text{STD}\{\mathbf{S}_{\text{local}}\}, \quad (2)$$

式中  $\text{STD}\{\cdot\}$  为求标准差操作,  $\mathbf{S}_{\text{local}}$  为局部标准差分布矩阵。

$$s_{\text{local}}(i, j) = \sqrt{\frac{1}{mn} \sum_{l=-(m-1)/2}^{(m-1)/2} \sum_{k=-(n-1)/2}^{(n-1)/2} [f(i+l, j+k) - \mu_f]^2}, \quad (3)$$

式中  $s_{\text{local}}(i, j)$  是图像坐标  $(i, j)$  邻域的标准差,  $f(i, j)$  为图像坐标  $(i, j)$  处的灰度值,  $m \times n$  是模板的尺寸,  $\mu_f$  是以坐标  $(i, j)$  中心  $m \times n$  邻域的平均值。此处,  $m = n = 3$ , 这样设置主要考虑到清晰边缘的实际像素数, 太小检测不到边缘且比较费时; 太大会降低其对边缘的表现能力。局部标准差通过 Matlab 里自带的局部标准差函数来实现, 描述为

$$G = \text{stdfilt}(I, N_{\text{OD}}), \quad (4)$$

式中  $\text{stdfilt}(\cdot)$  为操作输出——局部标准差矩阵,  $I$  为被操作对象,  $N_{\text{OD}}$  为邻域模版, 其尺寸只能取奇数。

### 3 仿真实验与结果分析

一般认为, 一个好的 FCF 应该具备灵敏度高、单峰性、无偏性和稳健性好等性能<sup>[6,25]</sup>。高灵敏度要求 FCF 曲线在需要判断的  $L_{\text{FD}}$  附近(又称峰宽)要有明显的数值变化, 峰宽的位置通常设置在主峰值的 50% 处, 峰宽越小灵敏度越高; 单峰性要求 FCF 所需要判断的极大值点要唯一; 无偏性要求 FCF 计算得到的  $L_{\text{FD}}$  与实际的  $L_{\text{FD}}$  一致; 高信噪比是指 FCF 曲线的计算受到无关内容的影响程度要小,

通常表现在聚焦曲线上除主峰外的极大值点(其对应的峰称假峰)相对于主峰的幅度及其数量上, 假峰幅度越小, 数量越少, FCF 的信噪比越高。

为了验证方法的各项性能和通用性, 实验对一些真实自然环境下拍摄的全息图进行测试, 它们是用不同的分辨率或像元尺寸的 CCD 记录的, 但  $L_{\text{FD}}$  均 50~470 mm 范围内。为了叙述方便, 对它们进行了数字编号。对每一幅全息图, 并将最后的结果与 SOG<sup>[2]</sup>, Contrast<sup>[3]</sup>, Tenegrad<sup>[6]</sup> 和 SOA<sup>[19]</sup> 的结果进行对比。实验环境为: Win8 系统, 2 G 内存, Matlab2012。

#### 3.1 FCF 的性能验证

为了证明算法的有效性, 实验对一些全息图(全息图占据较多篇幅, 因此并没有给出)以 5 mm 间隔进行重建, 并把最佳  $L_{\text{FD}}$  的重建像(如图 1 所示)和重建过程中重建像的 FCF 曲线(如图 2 所示)记录下来。图 1 的第 1 行为真实  $L_{\text{FD}}$  对应的重建像, 第 2 行为本文方法函数极大值点对应  $L_{\text{FD}}$  的重建像; 图 1(a)和图 1(d)为全息图 5 的重建像, 该生物结构比较复杂, 微小结构比较多; 图 1(b)和图 1(e)为全息图 1 的重建像, 该生物结构稍次之, 细节比较少, 图 1(c)和图 1(f)为全息图 7 的重建像, 该生物结构比较简单, 基本没有细节。从图 1 上下行比较可以看

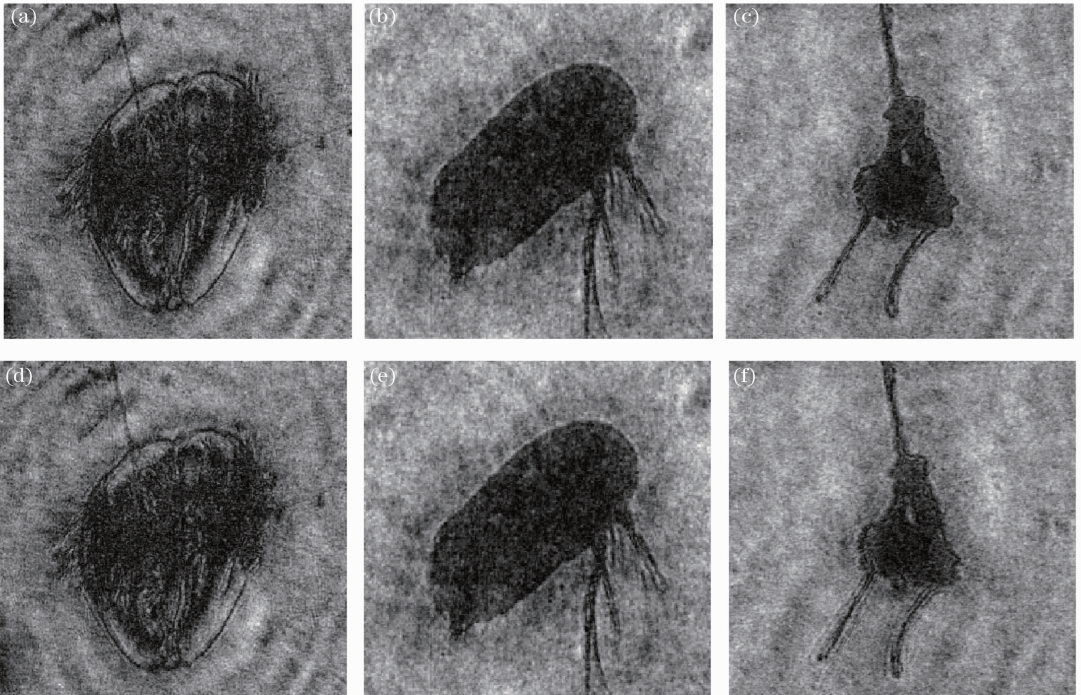


图 1 真实重建距离的重建像(a), (b), (c)和该方法函数极大值点对应重建距离(d), (e), (f)

Fig.1 Reconstructed image with real  $L_{\text{FD}}$ (a), (b), (c) and  $L_{\text{FD}}$  corresponding to maximum of this method's function (d), (e), (f)

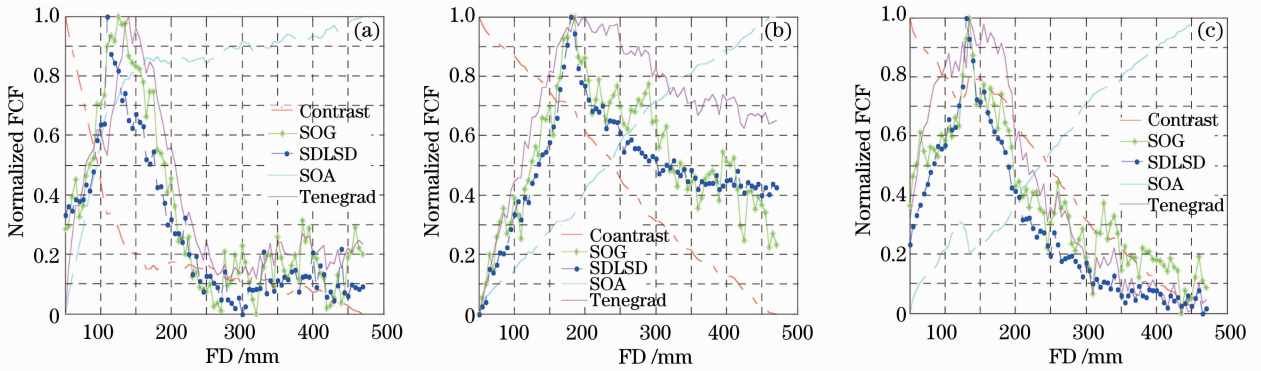


图 2 (a)图 1(a), (b)图 1(b), (c)图 1(c)在不同 FCF 下随  $L_{FD}$  变化的函数曲线

Fig. 2 Function curves of FCFs for images in (a) Fig. 1(a), (b) Fig. 1(b) and (c) Fig. 1(c) with variation of  $L_{FD}$

出该方法的极大值点对应的  $L_{FD}$  基本接近或达到真实  $L_{FD}$ 。从判定结果看,无论对复杂结构的生物全息图还是简单结构的生物全息图,该方法都能获得较为准确的  $L_{FD}$ ,这就说明该方法在清晰度表达上是有效的。

为了证明提出方法的有效性,与常用方法和较的新方法进行了比较。图 2 显示了全息图 1、5 和 7 分别在提出方法及另外四种方法下的归一化 FCF 曲线,用红色短虚线、浅蓝色长虚线、粉色实线、绿色米实线和蓝色点虚线分别表示 Contrast、SOA、Tenegrad、SOG 和提出方法。从图 2(a)~(c)的 FCF 曲线可以看出,对比度(红虚)和 SOA(浅蓝长虚)的函数曲线不具备单峰性,也就说明这两种方法不适用该研究对象。

在单峰性上:从图 2(a)和图 2(c)可得出, Tenegrad(粉实)和 SOG(绿米实)的函数曲线表现出一定的单峰性,而该方法(蓝点虚)函数曲线却具有较好的单峰性;在图 2(b)中, Tenegrad 的函数曲线的单峰性几乎消失,而 SOG 和提出算法仍然保持着较好的单峰性。这说明该方法具有较好的单峰性。

在灵敏度上:从图 2(a)可得出,提出算法的峰

宽要比 Tenegrad 和 SOG 的小很多;在图 2(b)和图 2(c)中, SOG 和提出方法的峰宽都要比 Tenegrad 的都要小,但提出方法的峰宽比 SOG 的还要小。这说明提出方法具有相对较高的灵敏度。

在信噪比方面,从图 2(a)~(c)可以看出, Tenegrad(粉实)的假峰的数量和 SOG(绿米实)差不多,前者的假峰相对主峰的幅度比后者的小,而提出方法在假峰幅度和数量上都要比 Tenegrad 和 SOG 小,这说明提出的算法具有较高的信噪比。

综上所述,与其他四种方法相比,提出的方法无论是在单峰性、灵敏度还是在信噪比方面都具有相对较好的性能。

### 3.2 实用性和通用性验证

为了验证算法的通用性和实用性,在  $L_{FD}$  为 50~470 mm 的区间上以 5 mm 和 1 mm 间隔分别进行了一些全息图的重建实验,然后取各 FCF 曲线的极大值点对应  $L_{FD}$  为最佳聚焦距离,实验的结果如表 1 和表 2 所示,其第 1 行是编了号的全息图,其第 1 列是聚焦评价函数,其内部为各全息图在各 FCF 下得到最佳  $L_{FD}$ ,其中该方法得出的结果见标准加粗数据所示。

表 1 不同全息图以 5 mm 间隔在 5 种 FCF 下得到的最佳  $L_{FD}$

Table 1 Best  $L_{FD}$  of different holograms determining with 5 FCFs by step of 5 mm

Hologram	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Contrast	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
SOA	470	470	465	280	470	455	465	470	470	465
Tenegrad	185	50	470	355	140	60	135	200	345	455
SOG	185	50	405	265	125	55	135	255	375	430
SDLS	<b>180</b>	<b>50</b>	<b>410</b>	<b>265</b>	<b>110</b>	<b>60</b>	<b>130</b>	<b>255</b>	<b>375</b>	<b>430</b>
Real $L_{FD}/mm$	180	260	410	265	111	219	132	256	380	430



表 2 不同全息图以 1 mm 间隔在 5 种 FCF 下得到的最佳  $L_{FD}$ 

 Table 3 Best  $L_{FD}$  of different holograms determining with 5 FCFs by step of 1 mm

Hologram	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Contrast	50	50	50	50	50	52	50	50	50	50
SOA	461	470	466	269	464	459	464	470	470	462
Tenegrad	202	50	458	348	131	58	136	204	346	456
SOG	181	50	407	264	131	58	131	255	376	430
SDLSD	<b>181</b>	<b>50</b>	<b>408</b>	<b>264</b>	<b>110</b>	<b>52</b>	<b>131</b>	<b>255</b>	<b>376</b>	<b>430</b>
Real $L_{FD}$ /mm	180	260	410	265	111	219	132	256	380	430

通过表 1 各行与最后一行(真实  $L_{FD}$ )的比较可知, Contrast(第 2 行)得到的各全息图最佳  $L_{FD}$  均是 50 mm(重建区间左端点), SOA(第 3 行)得到的都基本接近重建区间右端点, 且都远远偏离真实  $L_{FD}$ , 这与实验 1 中 Contrast 和 SOA 的函数曲线整体呈现单调性的结论一致。在 Tenegrad(第 4 行)下得到的各全息图最佳  $L_{FD}$  只有全息图 1 和 7 接近真实  $L_{FD}$ , 而其他均远离。除全息图 2 和 6 外, 在 SOG(第 5 行)下得到的最佳  $L_{FD}$  与真实  $L_{FD}$  的误差却在 35 mm 以内, 而在提出方法(第 6 行)下得到的与真实  $L_{FD}$  的误差均在 5 mm 以内。由此可以说明与其他方法相比, 该方法更具有通用性。

将表 1 和表 2 比较可以看出, 在以更小的间隔进行重建时, 在 Contrast 和 SOA 下获得的各全息图的最佳  $L_{FD}$  虽有所变化, 但大都仍处在  $L_{FD}$  区间左端点或右端点附近。通过 Tenegrad 获得的各全息

图的最佳  $L_{FD}$  只有在全息图 5 和 7 上接近真实  $L_{FD}$ 。除全息图 5 外, SOG 获得的结果基本和本文提出方法的相同, 且外都在真实  $L_{FD}$  的 5 mm 以内(不包括全息图 2 和 6)。由此可以说明: 相比于其他方法, 该方法更具有稳定性, 进而增加了其实用性。

对于全息图 2 和 6, 首先来观察其 FCF 曲线, 如图 3 所示。从图 3 可以看出, 除 SOA 外, 其余 FCF 曲线均在最小  $L_{FD}$  处取得最大值并随后逐渐减小, 但与其他四种 FCF 相比, 提出方法(蓝点虚线)仍能在真实  $L_{FD}$  邻域内表现出较为突出的峰。如果通过适当的搜索算法是可以检测该峰值的, 进而得到该峰值对应的  $L_{FD}$ 。这进一步说明该方法具有较强的实用性和通用性。另外, 通过实验 2 还可以得出, 与其他四种方法相比, 提出的方法获得的最佳  $L_{FD}$  均在真实  $L_{FD}$  邻域内, 这说明提出方法具有较好的无偏性。

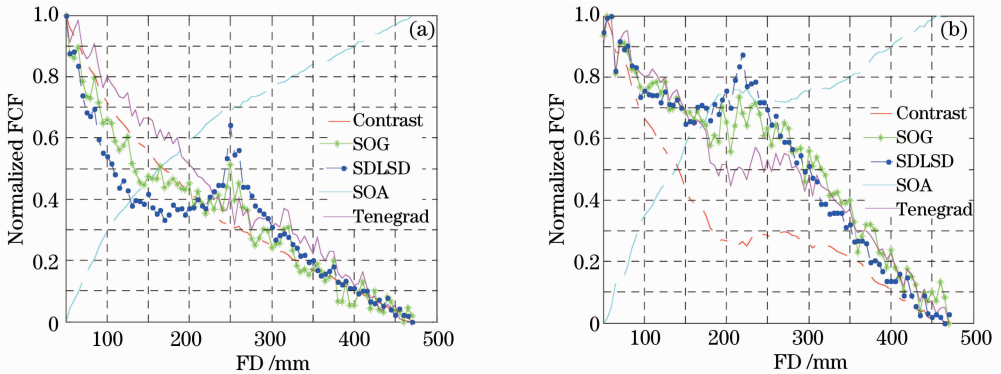


图 3 (a)全息图 2 和(b)全息图 6 的各 FCF 函数曲线

Fig. 3 Function curves of FCFs for (a) hologram 2 and (b) hologram 6

通过 3.1 节和 3.2 节可以得出, 与其他四种 FCF 相比, 提出的算法具有 FCF 的基本性能, 并对海洋生物全息图具有较强的实用性和通用性。

## 4 结 论

面向海洋生物全息图提出一种新的聚焦评价函数, 目的是解决海洋生物全息图自动聚焦的问题。该函数利用图像的局部标准差分布能够表现图像细

节信息的特性, 将局部标准差分布的离散程度作为重建像清晰程度反应, 克服了梯度方法稳健性较低和整体方差过平均的缺陷而更具有实用性和通用性。实验结果表明: 与其他四种方法相比, 提出的聚焦判据函数在性能上具有较好的单峰性和无偏性, 较高的灵敏度和较高信噪比等特点, 同时也证明了提出的方法对海洋生物全息图具有较强的实用性和通用性。因此, 该提出的方法很好地可以用于实现

海洋生物全息图的自动聚焦进而实现自动重建工作。然而对于一些生物全息图,提出的聚焦评价函数表现出较强的单峰性但不是最大的情况,没有给出相应的搜索方案,此搜索方法将更能保证该聚焦准则函数的通用性和实用性,因此它将是进一步有待研究的方向。

## 参 考 文 献

- 1 H Sun, D C Hendry, M A Player, *et al.*. In situ underwater electronic holographic camera for studies of plankton [J]. *IEEE J Oceanic Engineering*, 2007, 32(2): 373-382.
- 2 Z Binwu, C Linghong, Q Kunzan, *et al.*. Wavelet-based depth-of-field extension, accurate autofocusing and particle pairing for digital inline particle holography [J]. *Appl Opt*, 2014, 53(4): 556-564.
- 3 P Ferraro, P Memmolo, C Distanto, *et al.*. An autofocusing algorithm for digital holograms [C]. *SPIE*, 2012, 8384: 838408.
- 4 Wang Huaying, Wang Guangjun, Wang Dayong, *et al.*. Autofocus in digital holographic microscopy [J]. *J Optoelectronics•Laser*, 2010, 21(8): 1232-1236.  
王华英, 王广俊, 王大勇, 等. 数字全息显微中的自动聚焦[J]. *光电子•激光*, 2010, 21(8): 1232-1236.
- 5 Sun Jie, Yuan Yuehui, Wang Chuanyong. Comparison and analysis of algorithms for digital image processing in autofocusing criterion [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(1): 35-39.  
孙杰, 袁跃辉, 王传永. 数字图像处理自动图像聚焦算法的分析和比较[J]. *光学学报*, 2007, 27(1): 35-39.
- 6 Y Sun, S Duthaler, B J Nelson. Autofocusing in computer microscopy: selecting the optimal focus algorithm [J]. *Microscopy Research and Technique*, 2004, 65(3): 139-149.
- 7 Wang Qian, Song Enmin, Xu Xiangyang, *et al.*. Auto-focusing function for microscope image based on weighted neighborhood correlation [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(1): 166-171.  
王倩, 宋恩民, 许向阳, 等. 基于加权邻域相关性的显微镜自动聚焦函数[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(1): 166-171.
- 8 Xue Kai, Li Qi, Wang Qi. Wavelet-based autofocus algorithm for terahertz digital holographic imaging [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(B06): 384-390.  
薛凯, 李琦, 王骐. 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(B06): 384-390.
- 9 Li Lihong, Zhang Minglu. Research of focusing evaluation function under a strong shot-noise background [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(11): 116-121.  
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): 116-121.
- 10 Liu Changgeng, Wang Dayong, Zhang Yizhuo, *et al.*. Derivatives-based autofocus algorithms for the digital holographic imaging [J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(11): 2989-2996.  
刘长庚, 王大勇, 张亦卓, 等. 数字全息成像中基于导数的自动对焦算法[J]. *中国激光*, 2009, 36(11): 2989-2996.
- 11 J Zhao, D Wang, Y Wang, *et al.*. Autofocusing on pure phase object for living cell imaging in lensless Fourier transform digital holography [C]. *SPIE*, 2010, 7790: 779017.
- 12 Zhu Zhengtao, Li Shaofa, Chen Huaping. Research on auto-

- focused function based on the image entropy [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004, 12(5): 537-542.  
朱铮涛, 黎绍发, 陈华平. 基于图像熵的自动聚焦函数研究[J]. *光学精密工程*, 2004, 12(5): 537-542.
- 13 Wang Yiwen, Liu Xianli, Xie Hui. A wavelet-based focus measure and 3-D autofocusing for microscope images [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, 14(6): 1063-1069.  
王义文, 刘献礼, 谢晖. 基于小波变换的显微图像清晰度评价函数及3D自动调焦技术[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(6): 1063-1069.
- 14 Wang Fengpeng, Xie Xiaochun, Xie Yingmao, *et al.*. Autofocusing for digital inline holography and fusion of reconstructed image [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(4): 040901.  
王凤鹏, 谢晓春, 谢应茂, 等. 同轴数字全息自动聚焦与再现像的融合[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(4): 040901.
- 15 G Yang, B J Nelson. Wavelet-based autofocusing and unsupervised segmentation of microscopic images [C]. *IEEE Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2003, 3: 2143-2148.
- 16 M Lieblich, M Unser. Autofocus for digital Fresnel holograms by use of a Fresnel-sparsity criterion [J]. *J Opt Soc Am A*, 2004, 21(12): 2424-2430.
- 17 B Kemper, G von Bally. Digital holographic microscopy for live cell applications and technical inspection [J]. *Appl Opt*, 2008, 47(4): A52-A61.
- 18 R Senthilnathan, R Sivaramkrishnan. Focus measures for SFF-inspired relative depth estimation [C]. *IEEE International Conference on Machine Vision and Image Processing*, 2012, 185-188.
- 19 M Antkowiak, N Callens, C Yourassowsky, *et al.*. Extended focused imaging of a microparticle field with digital holographic microscopy [J]. *Opt Lett*, 2008, 33(14): 1626-1628.
- 20 V V Dyomin, D V Kamenev. Quality criteria for holographic images of particles of various shapes [J]. *Russian Physics Journal*, 2011, 53(9): 927-935.
- 21 V V Dyomin, D V Kamenev. A comparison of methods for evaluating the location of the best focusing planes of particle images reconstructed from digital holograms [J]. *Russian Physics Journal*, 2013, 56(7): 822-830.
- 22 P Ferraro, G Coppola, S De Nicola, *et al.*. Digital holographic microscope with automatic focus tracking by detecting sample displacement in real time [J]. *Opt Lett*, 2003, 28(14): 1257-1259.
- 23 Wang Yuqing. Application of local variance in image quality assessment [J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(5): 531-536.  
王宇庆. 局部方差在图像质量评价中的应用[J]. *中国光学*, 2011, 4(5): 531-536.
- 24 S Aja-Fernandez, R S J Estepar, C Alberola-Lopez, *et al.*. Image quality assessment based on local variance [C]. *IEEE 28th Annual International Conference on Engineering in Medicine and Biology Society*, 2006, 4815-4818.
- 25 Zhai Yongping, Zhou Dongxiang, Liu Yunhui, *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.