

# 一种基于能量分布的显微成像系统3D-PSF选取方法

陈 华 蔡 熠 杨凤娟 梁日柳 何双燕

广西大学计算机与电子信息学院, 广西 南宁 530004

**摘要** 在数字共焦显微技术的图像反卷积复原中, 三维点扩展函数(3D-PSF)空间大小的选取与图像复原效果有密切的关系。依据显微镜三维成像原理以及3D-PSF模型, 分析了显微镜3D-PSF的能量分布和3D-PSF空间大小的关系, 提出了一种通过复原效率与能量关系曲线拐点进行能量阈值确定, 以实现3D-PSF空间大小选取的方法。模拟了生物光学显微镜3种不同数值孔径(放大倍数)物镜下图像的采集和3D-PSF的生成, 获取不同能量大小3D-PSF对细胞三维仿真图像的反卷积复原结果。提出的方法为三维显微图像反卷积复原中3D-PSF的自动选取奠定了基础。

**关键词** 成像系统; 三维点扩展函数; 选取方法; 能量; 反卷积; 复原效率

中图分类号 TH74

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0211001

## A 3D-PSF Selection Method for Microscopic Imaging System Based on Energy Distribution

Chen Hua Cai Yi Yang Fengjuan Liang Riliu He Shuangyan

College of Computer Science and Electronic Information, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China

**Abstract** In the image deconvolution of digital confocal microscopy system, the selection of spatial size of three dimensional point spread function (3D-PSF) is closely related to the effect of image restoration. Based on the principle of three-dimensional microscopic imaging and 3D-PSF model, the relationship between the energy distribution and the size of 3D-PSF is analyzed, and a 3D-PSF size selection method is proposed and realized, which uses the restoration efficiency - energy curve inflection point for energy threshold determination. The acquisition of image and the generation of 3D-PSF of bio-optical microscope objective of three kinds of numerical aperture or magnification are simulated, and the deconvolution restoration results of three-dimensional simulated cell images by using the 3D-PSFs with different energy are obtained. The experimental results show the effectiveness and feasibility of the proposed method, and provide a basis for automatic selection of 3D-PSF for the three-dimensional microscopic image deconvolution.

**Key words** imaging systems; three dimensional point spread function; selection method; energy; deconvolution; restoration efficiency

**OCIS codes** 110.6880; 100.1830; 180.6900; 170.1790

## 1 引 言

共焦显微成像技术在提高成像分辨率方面具有很大的潜力<sup>[1-2]</sup>, 而点扩展函数的研究则在各种图像复原、提高图像分辨率的应用中具有重要的意义<sup>[3-5]</sup>。在数字共焦显微技术<sup>[6]</sup>研究中, 针对生物光学显微镜采集到的生物样本序列光学切片图像受离焦成分影响造成分辨率下降的问题, 研究人员提出了多类三维显微图像复原算法进行去卷积处理, 提高图像分辨率, 获得清晰的二维图像序列和三维图像<sup>[7-14]</sup>。如文献[7]提出了两种线性非迭代算法, 用于含泊松噪声图像的去卷积复原。文献[8]提出了基于贝叶斯反演理论的算法, 可

收稿日期: 2015-06-01; 收到修改稿日期: 2015-10-07

基金项目: 国家自然科学基金(61164019)、广西自然科学基金(2012GXNSFAA053216)

作者简介: 陈 华(1958—), 男, 博士, 教授, 主要从事数字共焦显微技术、生物显微数字图像复原等方面的研究。

E-mail: chenhua\_cn@163.com

以有效改善三维分辨率。文献[11]在最大似然估计盲去卷积算法中使用一种内核密度处罚项,可以提高去卷积效果,并且改善信噪比。文献[14]则提出了一种快速迭代的去卷积方法,针对不同生物样本深度采用不同的点扩展函数。以上这些方法在图像复原处理过程中,所采用的三维点扩展函数(3D-PSF)的空间大小决定着其去卷积复原效果与复原时间<sup>[15-16]</sup>。选取3D-PSF空间越大,复原效果越好,但同时处理时间也越长。

研究显示,3D-PSF的能量由其中部沿轴向和径向有规律扩散,能量分布为对顶双锥体<sup>[17]</sup>。本文根据光学显微成像系统中3D-PSF的能量分布,以及显微镜物镜3D-PSF能量的选取对三维显微图像复原效果的影响,研究并提出一种基于复原效率与能量分布的3D-PSF空间大小选取方法。

## 2 显微成像模型与点扩展函数

### 2.1 显微系统成像模型

在显微成像系统中,厚样本函数 $f(x, y, z)$ 通过显微镜光学系统在像平面 $z'$ 处得到的图像 $g(x, y, z')$ 表示为<sup>[18]</sup>

$$g(x, y, z') = \iiint_{-\infty-\infty-\infty}^{\infty \infty \infty} f(x', y', z) h(x - x', y - y', z' - z) dx' dy' dz, \quad (1)$$

式中 $h(x, y, z - z')$ 表示散焦量为 $z - z'$ 的3D-PSF。图像成像模型可以表示为样本函数 $f$ 与3D-PSF $h$ 的卷积:

$$g = f * h. \quad (2)$$

### 2.2 显微成像系统点扩展函数数学模型

三维图像的复原处理需要知道成像系统的3D-PSF。3D-PSF可以从散焦光学传递函数(OTF)的傅里叶逆变换中得到。在光学切片分析中,首先要考虑不同散焦量的二维点扩展函数(2D-PSF)。圆孔散焦光学传递函数的表达式为<sup>[18]</sup>

$$H(w, q) = \frac{1}{\pi} (2\beta - \sin 2\beta) \cdot \text{jinc} \left[ 4kw \left( 1 - \frac{|q|}{f_c} \right) \frac{q}{f_c} \right], \quad (3)$$

式中 $w$ 为散焦误差, $w = \Delta z \cdot NA^2 / 2$ ,  $\Delta z$ 为散焦量, $NA$ 为数值孔径; $q$ 为频率, $q^2 = u^2 + v^2$ ,  $u$ 和 $v$ 分别为 $x$ 和 $y$ 方向的频率; $f_c$ 为系统的截止频率, $f_c = \frac{2NA}{\lambda}$ ,  $\lambda$ 为波长, $\beta = \cos^{-1} \frac{q}{f_c}$ ,  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ,  $\text{jinc}(x) = 2 \frac{J_1(x)}{x}$ 。

通过计算不同散焦量的光学传递函数,即可得到一系列相应的散焦2D-PSF,从而构成3D-PSF。

### 2.3 3D-PSF能量分布

设3D-PSF $h(r)$ 为 $r(x, y, z)$ 处的灰度函数,则其在无限空域的能量 $E$ 可表示为<sup>[19]</sup>

$$E = \int_0^{\infty} |h(r)|^2 dr. \quad (4)$$

$h(r)$ 在有限的离散空域中的能量 $E(r)$ 可以表示为

$$E(r) = \sum_0^r |h(r)|^2 \Delta r. \quad (5)$$

按(3)式构建3D-PSF $h(r)$ ,以 $|h(r)|^2$ 计算3D-PSF中各点的能量值,构建3D-PSF空间能量分布模型。图1(a)

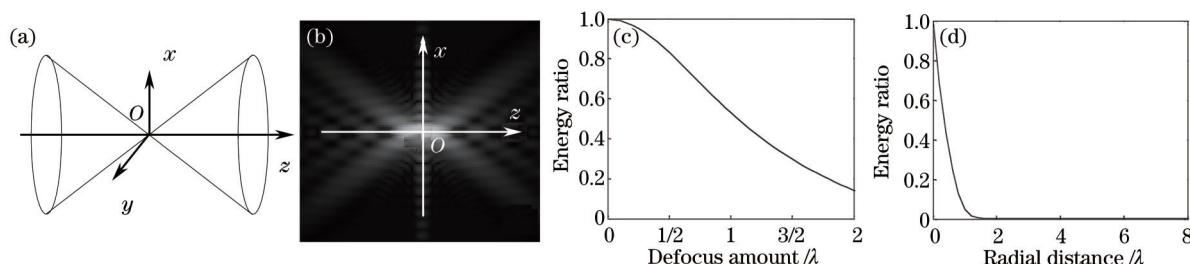


图1 3D-PSF能量分布示意图。(a)双锥体结构;(b)轴向剖面能量强度;(c)轴向能量分布;(d)径向能量分布

Fig.1 3D-PSF energy distribution. (a) Double cone structure; (b) axial cross-section energy gray-scale diagram;

(c) axial energy distribution; (d) radial energy distribution

所示为3D-PSF双锥体能量分布结构模型,  $z$ 为光轴方向,  $x, y$ 为径向方向;图1(b)为数值孔径  $NA=0.6$ 、放大倍数为40的显微镜光学系统3D-PSF轴向剖面能量强度示意图;图1(c)、(d)分别为以双锥体顶点为原点的3D-PSF光轴轴向能量分布图,以及  $z=0$ 处的径向能量分布图,其中横轴均为以波长  $\lambda$ 为单位的散焦量(散焦距离)。

由图1(b)可以看出,3D-PSF的能量集中在双锥体中间顶部。由图1(c)和图1(d)可以看出,随着轴向散焦量的增大和  $z=0$ 径向距离的增大,3D-PSF能量迅速衰减。

在三维显微图像复原中,由于3D-PSF的能量集中在双锥体锥顶部的小区域内,可以根据复原图像一般浏览以及分析测量的不同用途和要求程度,研究这部分小区域的选取,而舍去周围大部分能量稀少区域,既获得良好复原效果,同时减少复原时间,提高图像复原处理效率。

### 3 3D-PSF 选取方法的提出

#### 3.1 图像复原效率

在图像复原的研究中,通常采用改善信噪比  $R_{ISNR}$ 作为评价图像复原效果的客观标准,

$$R_{ISNR} = 10 \log \left( \frac{|f-g|^2}{|\hat{f}-f|^2} \right), \quad (6)$$

式中  $f, g$  和  $\hat{f}$  分别为三维生物显微样本清晰图像、模糊切片图像和复原结果图像。根据(6)式计算出的改善信噪比数值越大,图像的复原效果越好。

但若同时要同时考虑图像复原的效果和复原产生的时间代价,需要同时考虑时间因素。本文提出了一个新的图像复原效率评价准则。设复原处理耗费的时间为  $t$ ,定义图像复原效率  $q$  为单位时间内获取到的  $R_{ISNR}$ ,即

$$q = R_{ISNR} / t. \quad (7)$$

#### 3.2 基于能量分布的3D-PSF选取方法

实验研究发现,复原效果  $R_{ISNR}$  与复原效率  $q$  分别与3D-PSF能量  $E$  存在如图2所示的关系。图2中横轴和纵轴表示的量通过箭头表示大小,为无量纲量。随着所取3D-PSF能量  $E$  的增大,3D-PSF对图像的复原效果不断提高,如图2中  $R_{ISNR}-E$  曲线所示。对应地,复原效率  $q$  与3D-PSF能量  $E$  存在图2中  $q-E$  曲线所示的关系:在3D-PSF空间大小较小、能量较小时,复原效率  $q$  处于上升阶段,  $q$  增幅为正;到达峰顶时,复原效率  $q$  处于极大值,停止上升,  $q$  增幅为零。随着3D-PSF空间大小和能量的增大,复原效率  $q$  开始下降,  $q$  增幅为负。到  $q-E$  曲线的拐点  $\gamma$  处,  $q$  的二阶导数为零,即  $q$  增幅率为零。在此拐点处,复原效率  $q$  下降到相当程度,而复原效果上升到相当程度,开始获得较好的效果。

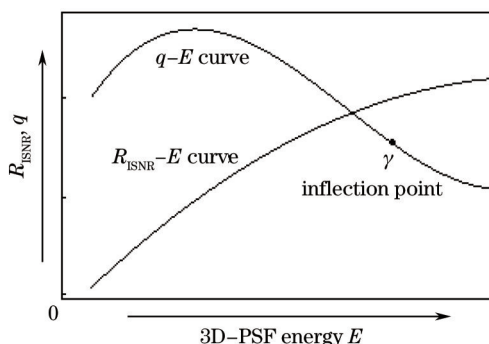


图2 3D-PSF的  $R_{ISNR}-E$  及  $q-E$  关系曲线

Fig.2  $R_{ISNR}-E$  curve and  $q-E$  curve of 3D-PSF

进行图像复原处理时,可以将与此拐点对应的能量值  $E_\gamma$  定为能量阈值。选取3D-PSF时可以考虑:以能量阈值  $E_\gamma$  为起点,将大于并且最接近  $E_\gamma$  能量的3D-PSF定为起点3D-PSF。若希望快速获得可用于一般观察浏览的复原图像,可以选择起点3D-PSF或能量稍大的3D-PSF。若复原图像用于精确分析测量,可以选择能量更大的3D-PSF,以获得更高的分辨率和更好的复原效果。对复原图像的效果要求越高,选取3D-PSF的能量越大。

依据上述思想,得到3D-PSF的选取步骤和方法为:

- 1) 通过图像复原实验,求出复原效率  $q$  与各 3D-PSF 能量大小  $E$  的对应关系;
- 2) 求出关系方程,画出拟合曲线;
- 3) 对曲线求二阶导数,获得曲线的拐点  $\gamma(q_\gamma, E_\gamma)$ ;
- 4) 确定 3D-PSF 的能量阈值  $E_\gamma$ ,选定起点 3D-PSF;
- 5) 以起点 3D-PSF 作为最小可选 3D-PSF,根据对复原处理的不同要求及程度,选取合理的 3D-PSF。

## 4 三维样本仿真复原实验

### 4.1 3D-PSF 制作

设置参数:显微镜机械镜筒长度为 160 mm;光源波长为 550 nm;CCD 参数:1/3 inch(1 inch=2.54 cm),像素数为 640 pixel×480 pixel。

显微镜光学系统分别取以下 3 种放大倍数  $M$  和对应的数字孔径  $NA$ ,表示 3 个不同的光学系统:

- 1)  $M=10, NA=0.25$ ;
- 2)  $M=20, NA=0.45$ ;
- 3)  $M=40, NA=0.6$ 。

3D-PSF 层距  $L$  取  $0.3125 \mu\text{m}$ ,根据(1)式制作 3 组空间大小为  $21 \times 21 \times 21$  的 3D-PSF,其径向大小为  $21 \times 21$ ,轴向大小为 21,分别以  $h_{21,10}$ 、 $h_{21,20}$ 、 $h_{21,40}$  表示 3 种不同放大倍数  $M$  和数字孔径  $NA$  光学系统的 3D-PSF。

### 4.2 三维样本仿真图像制作

以图 3(a)的二维原始清晰图像( $151 \times 151$ ) 作为初始样本,通过逐次微角度旋转,得到 21 幅二维图像,叠加制作成大小为  $151 \times 151$ 、21 层的三维仿真样本图像  $f$ ,空间大小为  $151 \times 151 \times 21$ 。

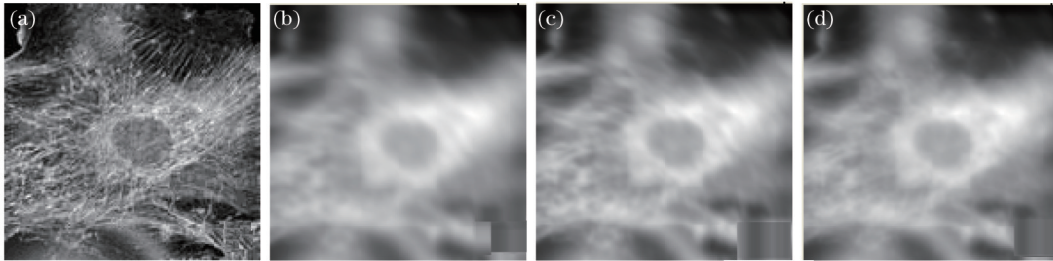


图 3 仿真图像。(a) 原始清晰图像;(b) 模糊图像  $g_{10,0}$ ;(c) 模糊图像  $g_{20,0}$ ;(d) 模糊图像  $g_{40,0}$

Fig.3 Simulated images. (a) Original image; (b) blurred image  $g_{10,0}$ ; (c) blurred image  $g_{20,0}$ ; (d) blurred image  $g_{40,0}$

根据(2)式,分别用  $h_{21,10}$ 、 $h_{21,20}$ 、 $h_{21,40}$  3 个不同光学系统的 3D-PSF 与图像  $f$  进行卷积,得到 3 个不同的三维模糊图像  $g_{10,0}$ 、 $g_{20,0}$  和  $g_{40,0}$ ,即样本图像  $f$  的三维成像。图 3(b)~(d)所示分别为对 3 个不同的三维成像取中心层的二维图像。

### 4.3 三维仿真图像复原

以  $h_{21,10}$ 、 $h_{21,20}$ 、 $h_{21,40}$  3 个 3D-PSF 的空间中心点(11,11,11)为中心,向外依次截取的空间大小分别为  $3 \times 3 \times 3$ 、 $5 \times 5 \times 5$ 、 $7 \times 7 \times 7$ 、 $\dots$ 、 $19 \times 19 \times 19$ ,得到 3 组各 9 个 3D-PSF,加上本身  $21 \times 21 \times 21$ ,得到 3 组各 10 个 3D-PSF,分别命名为  $h_{3,x}$ 、 $h_{5,x}$ 、 $h_{7,x}$ 、 $\dots$ 、 $h_{19,x}$ 、 $h_{21,x}$  (其中  $x$  表示放大倍数 10、20 或 40)。

用上述 3 组 3D-PSF 对相应的模糊图像  $g_{-10}$ 、 $g_{-20}$ 、 $g_{-40}$  进行去卷积复原处理,采用最大似然法,迭代次数为 600 次。

### 4.4 能量与复原效果关系

分别计算以上 3 组 3D-PSF 在空间各点的能量值,将各点值累加获得相应 3D-PSF 的能量  $E$ 。每组 3D-PSF 的能量值  $E$  均以  $h_{21,x}$  能量值为标准进行归一化处理。这 3 组 3D-PSF 的空间大小  $s$ 、能量大小  $E$ 、复原效果  $R_{\text{ISNR}}$  以及复原效率  $q$ ,如表 1 所示。其中空间大小  $s$  以像素数表示。

根据表 1 的实验结果,分别画出 3 个不同 3D-PSF 的能量  $E$  与空间大小  $s$ 、复原效果  $R_{\text{ISNR}}$  与能量  $E$ 、复原效果  $R_{\text{ISNR}}$  与空间大小  $s$ 、复原效率  $q$  与能量  $E$  等 4 组数据的关系曲线,如图 4 所示。

表 1 3D-PSF 能量与复原效果的关系

Table 1 Relationship between energy and restoration effect

3D-PSF	$s$ /pixel	$E$ 10×	$R_{ISNR}$ 10×	$q$ 10×	$E$ 20×	$R_{ISNR}$ 20×	$q$ 20×	$E$ 40×	$R_{ISNR}$ 40×	$q$ 40×
$h_{3,x}$	27	0.09	0.12	0.117	0.21	0.25	0.253	0.34	0.28	0.281
$h_{5,x}$	125	0.216	0.30	0.106	0.42	0.84	0.287	0.58	0.79	0.290
$h_{7,x}$	343	0.334	0.69	0.100	0.57	1.23	0.180	0.76	1.35	0.196
$h_{9,x}$	729	0.444	0.96	0.067	0.69	1.44	0.099	0.84	1.91	0.131
$h_{11,x}$	1331	0.543	1.14	0.036	0.78	1.80	0.056	0.90	2.46	0.075
$h_{13,x}$	2197	0.641	1.44	0.028	0.85	2.15	0.041	0.93	2.97	0.054
$h_{15,x}$	3375	0.737	1.78	0.024	0.90	2.51	0.032	0.95	3.44	0.042
$h_{17,x}$	4913	0.830	2.18	0.020	0.94	2.82	0.025	0.97	3.82	0.032
$h_{19,x}$	6859	0.918	2.54	0.017	0.98	3.04	0.020	0.99	4.13	0.026
$h_{21,x}$	9261	1	2.68	0.013	1	3.15	0.015	1	4.26	0.020

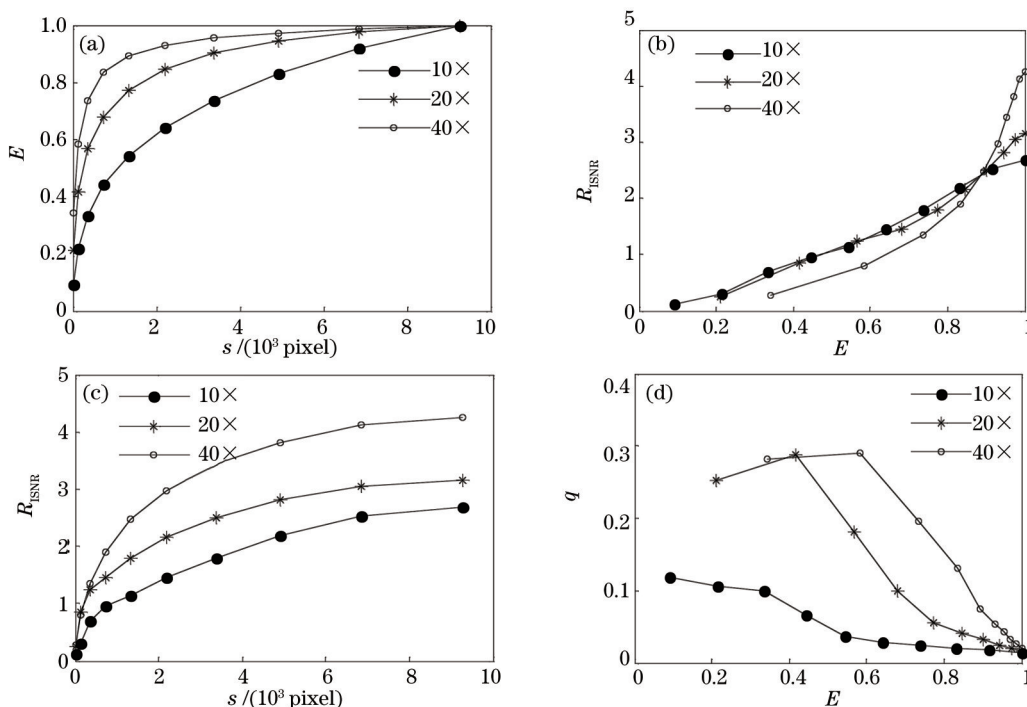


图 4 图像复原与 3D-PSF 关系图。(a) 能量与空间大小的关系; (b) 复原效果与能量的关系; (c) 复原效果与空间大小的关系; (d) 复原效率与能量的关系

Fig.4 Relationship between image restoration and 3D-PSF. (a) Relationship between energy and size; (b) relationship between restoration effect and energy; (c) relationship between restoration effect and size; (d) relationship between restoration efficiency and energy

由图 4(a)可知,随着 3D-PSF 空间大小不断增大,3D-PSF 包含的能量值  $E$  也逐渐变大。同时可看出放大倍数  $M$  越大的 3D-PSF,其曲线越靠上,表明放大倍数较大的 3D-PSF 的能量更为集中在双锥顶部附近,放大倍数较小的 3D-PSF 的能量扩散到距双锥顶部较远的区域。由图 4(b)可知,3D-PSF 能量越大,图像的复原效果越好。由图 4(c)可知,3D-PSF 空间大小越大,图像的复原效果越好。同时空间大小相同、放大倍数较大的 3D-PSF,图像复原的效果较好。这是由于放大倍数较大的 3D-PSF 的能量更为集中在锥顶附近,相同的空间区域包含着更多的能量。由图 4(d)可知,图像复原效率  $q$  与 3D-PSF 能量  $E$  基本呈反向关系,并且放大倍数较大的 3D-PSF 图像复原的效率较高。

由上述分析可知,3D-PSF 包含的能量对图像复原效果具有明显的正向影响,3D-PSF 能量越大,图像复原效果越好,而图像复原效率却越低。原因是随着能量的增大,3D-PSF 空间大小呈几何增大,图像处理时间  $t$  也呈几何量级增大,以时间作基数的图像复原效率  $q = R_{ISNR}/t$  随着 3D-PSF 空间的增大不断下降。因此,在三维显

微图像复原过程中,应结合图像复原效果和图像复原效率两种评价准则来权衡确定 3D-PSF。

## 5 基于能量分布的 3D-PSF 选取

### 5.1 $q-E$ 曲线拐点位置的确定

将图 4(d)中 3 种放大倍数的复原效率  $q$  与能量  $E$  之间的数值对应关系进行拟合。 $M=10$ 、 $M=20$ 、 $M=40$  的复原效率与能量关系拟合式为

$$f_1(x) = -1.15x^4 + 2.855x^3 - 2.28x^2 + 0.5x + 0.086, \quad (8)$$

$$f_2(x) = -5.83x^4 + 16.87x^3 - 17x^2 + 6.49x - 0.51, \quad (9)$$

$$f_3(x) = 1.58x^4 - 2.14x^3 - x^2 + 1.7x - 0.12. \quad (10)$$

对(8)~(10)式分别求二次导数,令二次导数为零,求得各曲线的拐点 $\gamma$ 。3种放大倍数  $M$  的拟合曲线如图 5 所示。

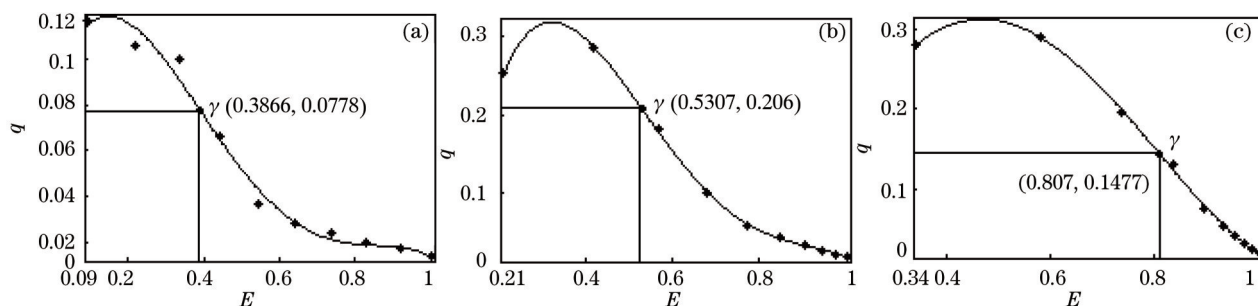


图 5 3 种放大倍数的  $q-E$  拟合曲线。(a)  $M=10$ ; (b)  $M=20$ ; (c)  $M=40$

Fig.5  $q-E$  fitted curves of three magnifications. (a)  $M=10$ ; (b)  $M=20$ ; (c)  $M=40$

3 种放大倍数下  $q-E$  拟合曲线的拐点 $\gamma$ 坐标分别是(0.3866,0.0778)、(0.5307,0.206)、(0.807,0.1477),对应的能量阈值 $E_\gamma$ 可分别确定为 0.3866、0.5307 和 0.807。对比表 1 中 3D-PSF 能量与复原效果的关系可知,大于并且最接近 $E_\gamma$ 的 3D-PSF 分别是  $h_{9_{10}}$ 、 $h_{7_{20}}$  和  $h_{9_{40}}$ ,这 3 个 3D-PSF 对应的能量与复原效率分别为(0.444,0.067)、(0.57,0.180)、(0.84,0.131)。

### 5.2 3D-PSF 选取

根据以上分析,选取 3D-PSF 时可将  $h_{9_{10}}$ 、 $h_{7_{20}}$  和  $h_{9_{40}}$  定为起点 3D-PSF。

以放大倍数为 40 倍的显微镜光学系统 3D-PSF 为例,拐点在(0.807,0.1477)处,能量阈值 $E_\gamma=0.807$ ,大于并且最接近该阈值点的 3D-PSF 是  $h_{9_{40}}$ ,因此,将  $h_{9_{40}}$  定为起点 3D-PSF。若希望快速获得可用于一般观察浏览的复原图像,可以选择  $h_{9_{40}}$  或稍大的  $h_{11_{40}}$ ,以获得快速复原处理效果。若复原图像用于精确分析测量研究,可以选择更大的  $h_{15_{40}}$ 、 $h_{19_{40}}$  等 3D-PSF,以获得更好、更精确的复原效果。对复原图像的效果要求越高,选取越大的 3D-PSF。采用  $h_{7_{40}}$ 、 $h_{9_{40}}$ 、 $h_{15_{40}}$  和  $h_{19_{40}}$  复原处理得到的复原结果如图 6 所示。

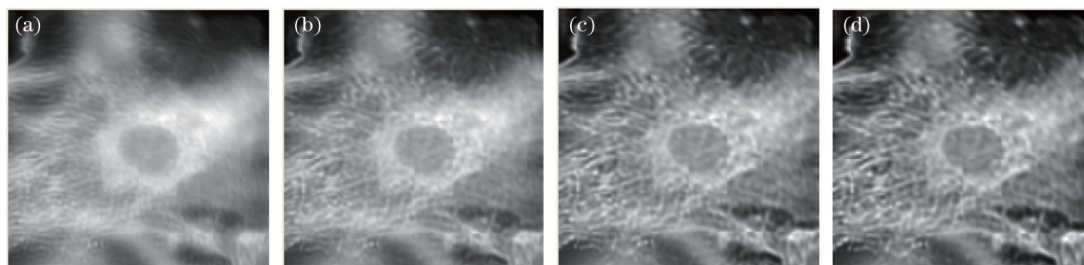


图 6  $M=40$  时 3D-PSF 的复原效果。(a)  $h_{7_{40}}$ ; (b)  $h_{9_{40}}$ ; (c)  $h_{15_{40}}$ ; (d)  $h_{19_{40}}$

Fig.6 Restoration results by  $M=40$  3D-PSF. (a)  $h_{7_{40}}$ ; (b)  $h_{9_{40}}$ ; (c)  $h_{15_{40}}$ ; (d)  $h_{19_{40}}$

从图 6 实验结果看,使用能量为 0.84 的  $h_{9_{40}}$  的图像复原效果 ( $R_{\text{ISNR}} = 1.91$ ) 明显好于能量为 0.76 的  $h_{7_{40}}$  的复原效果 ( $R_{\text{ISNR}} = 1.35$ ),且分辨率基本满足一般浏览的要求,可作为快速观察浏览图像使用。 $h_{15_{40}}$  和  $h_{19_{40}}$  复原获得的图像细节已经比较丰富,可满足分析测量使用。但比较这两个 3D-PSF 的复原效果,仍然可以看

出,图 5(d)较图 5(c)分辨率更高,细节成分更丰富。

实验表明,在考虑 3D-PSF 能量分布的情况下,以图像复原效率  $q$  作为图像复原的评价准则,依据复原效率曲线拐点可以实现三维显微图像复原时对 3D-PSF 的有效选取。

## 6 结 论

依据数字共焦技术中显微镜三维成像原理和 3D-PSF 模型,分析了显微镜 3D-PSF 的能量分布情况,提出了基于能量分布复原效率的图像复原评价准则,并提出依据复原效率曲线拐点选取 3D-PSF 的方法。采用不同能量的 3D-PSF 进行图像复原仿真实验,对实验数据和图像复原结果的分析表明,基于复原效率曲线拐点选取 3D-PSF 的方法有效并可行。该方法为数字共焦显微系统 3D-PSF 选取自动化的实现奠定了基础。

## 参 考 文 献

- 1 Wu Liru, Tang Zhilie, Wu Yongbo, *et al.*. Application of spatial differential confocal microscopy in obtaining edge enhanced microscopic images[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(3): 0317001.  
吴丽如,唐志列,吴泳波,等.应用共焦空间微分显微镜获取边缘增强显微图像[J].光学学报,2014,34(3):0317001.
- 2 Cheng Yi, Tang Zhilie. Study of confocal microscopy imaging system based on Stokes parameters measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(6): 0611005.  
程 怡,唐志列.基于斯托克斯参量测量的偏振共焦显微成像技术的研究[J].光学学报,2014,34(6):0611005.
- 3 Wen Changli, Xu Rong, Men Tao, *et al.*. Atmosphere turbulence blurred image restoration based on atmosphere coherent length[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(3): 0301002.  
温昌礼,徐 蓉,门 涛,等.基于大气相干长度的湍流模糊图像复原[J].光学学报,2014,34(3):0301002.
- 4 Hu Zhixiong, Hao Bingtao, Liu Wenli, *et al.*. Research on point spread function phantom fabrication and application for evaluating resolution performance of OCT systems[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(4): 0417001.  
胡志雄,郝冰涛,刘文丽,等.用于光学相干层析成像设备点扩散函数测量的模体制作与使用方法研究[J].光学学报,2015,35(4):0417001.
- 5 Tang Chaoying, Chen Yueting, Li Qi, *et al.*. Motion detection and image restoration based on video reconstruction from a single coded exposure photograph[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(4): 0410002.  
唐超影,陈跃庭,李 奇,等.基于视频重建的颤振探测与图像复原方法[J].光学学报,2015,35(4):0410002.
- 6 Su Binghua, Jin Weiqi, Liu Guangrong. Digital confocal microscope technology[J]. Optical Technique, 2000, 26(5): 421-423.  
苏秉华,金伟其,刘广荣.数字共焦显微技术[J].光学技术,2000,26(5):421-423.
- 7 Homem M R P, Mascarenhas N D A, da Costa L F. Linear filters for deconvolution microscopy[C]. 6<sup>th</sup> IEEE Southwest Symposium on Image Analysis and Interpretation, 2004: 142-146.
- 8 Laksameethanasan D, Brandt S S, Engelhardt P. A three-dimensional Bayesian reconstruction method with the point spread function for micro-rotation sequences in wide-field microscopy[C]. 3<sup>rd</sup> IEEE International Symposium on Biomedical Imaging: Macro to Nano, 2006: 1276-1279.
- 9 Zhang Ju, He Xiaohai, Tao Qingchuan, *et al.*. Restoration of 3 dimensional microscopical images based on Markov random field with adaptive regularization parameter[J]. Acta Photonica Sinica, 2008, 37(6): 1272-1276.  
张 菊,何小海,陶青川,等.基于 Markov 随机场的自适应正则化三维显微图像复原[J].光子学报,2008,37(6):1272-1276.
- 10 Soulez F, Denis L, Tourneur Y, *et al.*. Blind deconvolution of 3D data in wide field fluorescence microscopy[C]. 9<sup>th</sup> IEEE International Symposium on Biomedical Imaging (ISBI), 2012: 1735-1738.
- 11 Keuper M, Temerinac-Ott M, Padeken M, *et al.*. Blind deconvolution with PSF regularization for wide field microscopy[C]. 9<sup>th</sup> IEEE International Symposium on Biomedical Imaging (ISBI), 2012: 1292-1295.
- 12 Soulez F. A "learn 2D, apply 3D" method for 3D deconvolution microscopy[C]. 11<sup>th</sup> IEEE International Symposium on Biomedical Imaging (ISBI), 2014: 1075-1078.
- 13 Dong B, Shao L, Frangi A F, *et al.*. Three-dimensional deconvolution of wide field microscopy with sparse priors: Application to zebrafish imagery[C]. 22<sup>nd</sup> International Conference on Pattern Recognition (ICPR), 2014: 865-870.
- 14 Chacko N, Liebling M. Fast spatially variant deconvolution for optical microscopy via iterative shrinkage thresholding[C]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 2014: 2838-2842.

- 15 Chen H, Yang F J, Cai Y. Relationship between point spread function layers and image restoration based on the same space size[J]. Chemical and Pharmaceutical Research, 2014, 6(3): 537-542.
- 16 Chen H, Cai Y, Yang F J, *et al.*. Studies on three dimensional point spread function energy distribution of biological microscopic imaging system[J]. Chemical and Pharmaceutical Research, 2014, 6(3): 543-548.
- 17 Holmes T J, Bhattacharyya S, Cooper J A, *et al.*. Light microscopic images reconstructed by maximum likelihood deconvolution[M]. //Pawley J B (Ed.). Handbook of Biological Confocal Microscopy. New York: Springer, 1995: 389-402.
- 18 Castleman K R. Digital Image Processing [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 563-581.  
卡斯尔曼. 数字图象处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 563-581.
- 19 Zhang Xiao, Dong Yanxue, Zhao Wenjuan, *et al.*. Digital Image Processing Technology[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2005: 61-88.  
章 霄, 董艳雪, 赵文娟, 等. 数字图像处理技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2005: 61-88.

栏目编辑: 吴秀娟