

doi:10.3788/gzxb20154407.0711002

视觉注意机制与边缘展宽衡量相结合的 显微成像清晰度评价

赵巨峰^{1,2,3}, 毛磊¹, 刘承², 冯华君²

(1 宁波永新光学股份有限公司, 浙江 宁波 315040)

(2 浙江大学 现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

(3 杭州电子科技大学 电子信息学院, 杭州 310018)

摘 要:为得到与主观评价一致的衡量方法,结合视觉注意机制与边缘展宽衡量,提出一种显微图像清晰度评价指标.根据不同空间位置的像素灰度差距特征,计算视觉注意索引图来模拟人眼视觉系统观察景物的特性,从而赋予不同区域与像素不同的权重,通过分割实现对潜在对焦区域的提取.利用边缘展宽方法衡量这些区域,以水平与竖直方向的平均边缘展宽作为最后的清晰度指标.设计主观实验与客观实验,并与其他客观方法对比,结果表明该方法能有效克服现有方法的缺陷,解决显微图像清晰度评价中的关键问题,实现与主观评价一致的显微图像客观评价.

关键词:显微成像;清晰度;视觉注意;边缘展宽;对焦区域

中图分类号: TN911.73, O439

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)07-0711002-7

Microscopy Imaging Definition Criterion Using Visual Attention Mechanism and Edge Spreading Evaluation

ZHAO Ju-feng^{1,2,3}, MAO Lei¹, LIU Cheng², FENG Hua-jun²

(1 Ningbo Yongxin Optics Co., Ltd., Ningbo, Zhejiang 315040, China)

(2 State Key Lab of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

(3 Electronics and Information College, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: To achieve the consistency with subjective evaluation, the paper proposes a microscopy image sharpness metric using visual attention mechanism and edge spreading measurement. According to the gray difference of pixels at different spatial location, visual attention index map is calculated to simulate the way of human vision system observing the features of scenery. By this way, weight is given for different regions and pixels, and the potential focusing areas is extract by segmentation. Using edge spreading evaluation in this areas, an average edge spreading of horizontal and vertical direction is obtained, which is considered as the last sharpness metric. The authors design experiments for subjective assessment and objective evaluation. The experiment and comparison demonstrate that, the proposed method can effectively solve the key problems in the evaluation of microscopy image, and satisfy the consistency of objective and subjective evaluation.

Key words: Microscopy imaging; Image definition; Visual attention; Edge spreading; Focus areas

OCIS Codes: 110.3000; 110.2960; 170.0180

0 引言

成像/图像清晰度评价与判定是显微镜成像优化

技术的重要组成部分,也是衡量显微成像质量的关键指标^[1-4].比如,显微镜焦深一般在 $0.2\sim 120\mu\text{m}$ 之间^[5],相对的景深十分狭窄,在成像时微小的深度变化

基金项目:国家自然科学基金(No.61405052)和浙江省博士后科研择优资助项目资助

第一作者:赵巨峰(1985-),男,讲师,博士,主要研究方向为光学成像,图像处理. Email:dabaozjf@hdu.edu.cn

收稿日期:2015-01-30;录用日期:2015-04-30

<http://www.photon.ac.cn>

就会导致图像信息变得模糊不清,对焦对象发生改变,即原先对焦准确的变为离焦模糊.随着数字成像技术的发展,图像清晰度指标在越来越多的领域得到应用,比如成像自动对焦、图像复原^[6]、修复质量评价、图像筛选等等,其中显微镜成像中的自动调焦技术的核心便是清晰度评价函数,当然,通过衡量图像清晰度也能间接检验成像系统的性能.

图像清晰度评价方法可分为主观方法和客观方法两大类.主观方法,通过人眼视觉系统(Human Visual System, HVS)的主观感知来判断鉴别图像对象的清晰度,全面、准确,但是比较耗时、费力,并且存在不同人的主观感知一致性的问题;而后者,通常根据设计的模型计算获得量化指标,快速、高效、稳定,但却没有主观评价的全面与正确.在实际应用中,往往需要的是客观评价的方法.

在显微成像中,客观评价清晰度的方法研究较为深入. Brenner 梯度清晰度函数是最先出现的清晰度评价函数之一^[7],模型简单,计算方便,速度非常快.然而此类梯度手段衡量清晰度法需有特定的应用背景.针对不同的应用对象、显微镜等,不同的函数对应不同的应用场合,环境的改变容易引起评价效果的剧烈变化,与主观背离.在此基础上,有研究者采用高通和带通两个滤波器对图像进行计算,改进了传统的 Brenner 算法,克服阈值对算法评价结果的影响^[8].此外,基于灰度梯度的其他数字图像评价函数也非常多^[9],研究者用图像灰度梯度向量模方和、Roberts 梯度和与拉普拉斯(8 邻域微分)算子和作为数字图像的评价函数,对离焦模糊和运动模糊等情况分别给出了实验结果,并进行了比较,发现能量拉普拉斯函数具有较好的评价性能^[10],拉普拉斯算子和法只是从能量的相对聚集程度来考察图像清晰度,缺乏考虑人眼视觉因素,导致很多时候与主观评价有出入.陈健等结合区域对比度的清晰度评价函数与梯度向量平方函数的特点提出眼底图像清晰度评价函数,将其用于自动对焦中^[11]. Hassen 等人认为,利用局部相位相干^[12],可以做到较好的图像清晰度评价.利用小波的概念,也可以估计全局与局部图像清晰度^[13],但对于显微图像,很多时候无法做到与主观一致.

传统客观评价方法,常常与主观评价相背离. HVS 能够自动判别图像是否清晰,尤其是自动找到与评估 HVS 想要观察的对象的清晰度. HVS 评估显微图像的过程难点包含 1) 只针对对焦准确的景物,自动忽略不清晰的物体;2) 与景物的多少无关;3) 看清景物,主要衡量对焦清晰景物的对比度、边缘锐度(尽量少弥散);4) 与照片曝光亮暗的关系不大(当然不能过曝或过或者过于昏暗).

然而机器视觉系统却不能准确区分与考虑这些.

因此,针对显微图像进行清晰度评价,如何设计满足这些条件的客观算法,以给出符合 HVS 一致的评价结果,是数字显微图像处理技术的关键难点之一.

本文结合视觉注意机制与边缘展宽衡量,提出了一种清晰度评价指标.采用一种利用不同空间位置的像素灰度差距来衡量视觉注意程度的方法,提取视觉注意索引图,给不同区域与像素设定不同的感兴趣观察权重;利用图像边缘的平均展宽,来表征与评估图像清晰的程度;结合两者,利用视觉注意索引图分割出对焦相对准确区域,并用边缘展宽方法衡量这些区域的清晰度.该方法可以实现与主观评价一致的显微图像客观评价.

1 结合视觉注意机制与边缘展宽衡量的清晰度评价

HVS 能够快速自动地寻找感兴趣的区域,这些区域大多是对焦准确区域,往往已经能表征显微图像的质量.因此,可以利用视觉注意机制提取这些区域可以解决引言中的难点 1).

此外,由于边缘是图像最基本的特征之一,人们发现通过图像边缘形状与锐度,能够反映目标的清晰程度.因此,采用平均化的边缘展宽程度来评价清晰度.首先,由于是平均化的,略去了数量的因子,这就与景物的多少无关了,可以满足难点 2);这种衡量方法本身就是考察边缘锐度的,可以满足难点 3);在一定的曝光范围内(没有过曝、没有过暗),边缘展宽的程度与图像亮度的关系不大,这样可以满足难点 4).

1.1 灰度差距法视觉注意索引图

在显微图像中,景物清晰表明对焦准确, HVS 对这些区域非常感兴趣;而随着景物的模糊, HVS 注意程度急剧减小,在显微图像中认为是某一类背景信息.

视觉注意索引图,与原始图像同等尺寸,是一个权重矩阵,取值范围为 $[0, 1]$.该矩阵反映 HVS 对显微图像各个区域或者像素位置的感兴趣程度.若索引图在某一区域或像素处的值越大,表明 HVS 对这个位置感兴趣程度越高,则越可能是对焦准确区域,称为潜在对焦准确区域.

本文提出一种使用不同空间位置的像素灰度差距来衡量视觉注意程度的方法,其根本是对比强度程度的体现.假设原始细微图像为 f ,视觉注意索引图为 M ,那么定义像素位置处 (i, j) 的视觉注意值为

$$M_{ij} = \sum_{\forall (x,y) \in f} D(f_{ij}, f_{xy}) \quad (1)$$

式(1)衡量的是像素之间的灰度差距, f_{ij} 即 f 在像素 (i, j) 处的灰度, (x, y) 表示图 f 内任意像素位置.而 $D(\cdot)$ 表示距离函数,满足

$$D(f_{ij}, f_{xy}) = |f_{ij} - f_{xy}| \quad (2)$$

因此,综合式(1)、(2),有

$$M_{ij} = |f_{ij} - f_{i1}| + |f_{ij} - f_{i2}| + \dots + |f_{ij} - f_{iN}| \quad (3)$$

式中, M, N 分为图像 f 的高度与宽度, 该式表示 (i, j) 处视觉注意值是由其灰度值与其他灰度值的差距决定的. 从式(3)中, 可以发现, 对于灰度值一致的值, 其视觉注意值是相同的. 但是, 实际上, 不同空间位置的像素/区域, HVS 感兴趣的程度不能单纯由灰度值决定, 即相同的灰度值含有相同的视觉注意值, 这个原理是很多场合下无法成立. 因此, 引入相对空间的概念, 认为在一定空间范围内, 相同灰度值的像素才具有相近的视觉注意值, 并且空间距离不同, 对视觉注意的贡献也是不同的, 这就需要在原先的理论基础上融入局部区域的概念.

在局部区域内, 图像 f 在 (i, j) 处的视觉注意值的获取思路设计为

$$M_{ij} = \sum_{(i,j) \in \Omega, \forall (x,y) \in \Omega} [\omega(f_{ij}, f_{xy}) D(f_{ij}, f_{xy})] \quad (4)$$

式中, Ω 是图像 f 中的一个区域, 通常, (i, j) 为区域 Ω 的中心, 而 ω 表示空间权重, 定义为

$$\omega(f_{ij}, f_{xy}) = e^{-[(i-x)^2 + (j-y)^2]^{0.5} / \sigma^2} \quad (5)$$

σ^2 是伸缩常数, 其越大, 该权重的影响范围越大, 距离越远的像素对当前像素的贡献越多. 从式(4)、(5)可以发现, (x, y) 离 (i, j) 越近, f_{xy} 对 M_{ij} 的影响越大.

对于图像 f , 任意像素 (i, j) 处的视觉注意值都可以用公式获取, 并通过算法优化与归一化, 可以快速获得视觉注意索引图 M , 且 $M \in [0, 1]$. 对于 M 中的元素, 数值越大, 表明 HVS 对对应位置感兴趣程度越高, 该位置与区域越接近对焦准确区域.

1.2 边缘展宽衡量清晰度

边缘是图像最基本的特征之一, 观察其变化可以表征图像的清晰程度^[14]. 一幅理想的清晰图像, 其边缘应该是近似阶跃响应的, 非常的锐利; 而离焦图像, 其边缘有一定的展宽, 通过衡量这个展宽的程度, 可以表征图像的清晰度. 对于显微图像, 同样适合这个原理. 因此, 本文利用水平与垂直方向的平均边缘展宽来衡量图像的清晰度, 展宽的单位是像素, 数值越大, 则边缘展宽越大, 表明图像清晰度越差.

对于边缘, 采用梯度方法获取, 本文所用的是图 1 所示的 Sobel 水平边缘算子与垂直边缘算子.

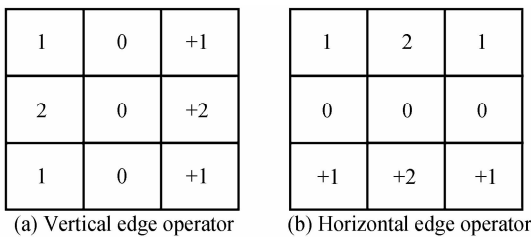


图 1 Sobel 算子

Fig. 1 Sobel operator

Sobel 对图像 f 的梯度综合衡量为

$$G(i, j) = \sqrt{|\frac{\partial f}{\partial i}|^2 + |\frac{\partial f}{\partial j}|^2} \quad (6)$$

$\frac{\partial f}{\partial i}$ 与 $\frac{\partial f}{\partial j}$ 分别是用水平与垂直算子计算得到的梯度分量.

假设输入图像为 f_0 , 本文设计的边缘展宽衡量法对 f_0 清晰度评价的具体思路为

1) 将边缘分为水平边缘与垂直边缘, 两者检测思路一致;

2) 水平边缘展宽衡量步骤为

a) sobel 水平算子检测输入图 f_0 , 通过阈值 T_0 的选择, 获得边缘图 E_0 ;

b) 针对 E_0 中的任意一个边缘点 k , 寻找该位置对应的 f_0 中附近(同一行)的极值点;

c) 从 b) 中获得的极值点之间的像素距离, 定义为该边缘点 k 的展宽 $width_k$;

d) 继续(b)(c), 对所有的边缘点求解相应的展宽, 获得 $width_k (k=1, 2 \dots N)$, N 为边缘点的数量;

e) 水平方向的平均边缘展宽定义为

$$Edge_e = \frac{\sum_{k=1}^N width_k}{N} \quad (7)$$

3) 与步骤 2) 同理, 可以获取垂直边缘展宽 $Edge_v$;

4) 综合的平均边缘展宽定义为

$$Edge = (Edge_e + Edge_v) / 2 \quad (8)$$

1.3 显微图像清晰度评价

本文设计的结合视觉注意机制与边缘展宽衡量的显微图像清晰度评价方法流程图如图 2 所示. 该方法主要内容为: 视觉注意索引图的计算, 潜在对焦准确区域的求取, 在此基础上对平均边缘展宽进行估计, 并将该值作为清晰度评价的指标. 潜在对焦区域, 表征的对焦准确的景物区域, 之所以称为潜在, 是因为该区域由视觉注意索引图计算获取而来, 并不是人工提取, 结合

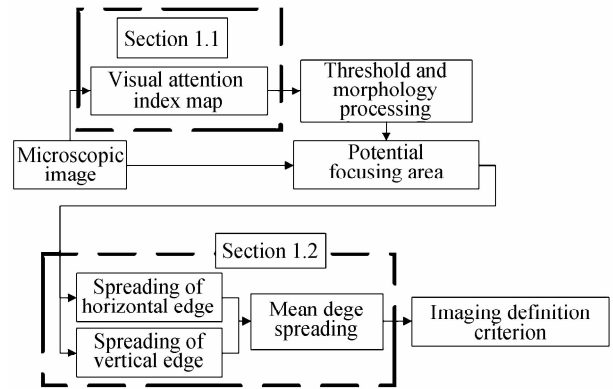


图 2 结合视觉注意机制与边缘展宽衡量的显微图像清晰度评价

Fig. 2 Flowchart for microscopy image sharpness metric using visual attention mechanism and edge spreading evaluation

阈值与形态学处理,作为提取对焦相对准确区域的辅助手段.

假设显微图像为 I_0 ,结合视觉注意机制与边缘展宽衡量的显微图像清晰度评价方法主要步骤为

1) 获取与 I_0 同尺寸的视觉注意索引图 M , $M \in [0, 1]$;

2) 阈值与形态学处理以获取潜在对焦准确区域.

在本文中,视觉注意索引图表征的对焦准确的程度,越接近 1 表示人眼越感兴趣即对焦越准确,即是越清晰区域.为提取出相对较为清晰的区域,利用阈值 T_h ,对 M 进行分割,获得二值图 BW,即

$$BW = (M > T_h) \quad (9)$$

使用形态学膨胀手段对该区域进行适当扩展,以完全包含相对清晰区域,即

$$W = BW \oplus \text{mask} \quad (10)$$

式中 mask 是 $R \times R$ 的结构元素, \oplus 是膨胀操作,得到二值化的清晰区域提取模板 W .该模板决定了提取的潜在对焦准确区域,非零处认为是潜在对焦准确区域.

因此,提取的潜在对焦准确区域对应的图像信息 F_0 为

$$F_0 = WI_0 \quad (11)$$

F_0 中,只有相对较为清晰的区域,即对焦相对准确区域,具有与原图相同的值,成为有效区域;其他区域都为零,即在接下去的步骤中不再考虑,称为无效区域.

3) 平均边缘展宽估计

根据 2) 中获取的潜在对焦准确区域 W ,非零位置对应应在 I_0 中的区域即 2) 中的 F_0 ,对 F_0 中的有效区域进行平均边缘展宽衡量,由此获得的边缘展宽估计即最后的清晰度评价指标.

显然,对于理想的图像,其边缘应该是阶跃式的,展宽极小,因此,该指标越小,越接近理想图像,图像清晰度越好.

2 实验与分析

2.1 参数设置与说明

在式(4)中, Ω 是图像 f 中的一个区域.由于图像本身是矩形的,因此这个区域一般定义高为 A 宽为 B ,相对于整幅图像可以认为是一个窗口.一旦设置了 $A \times B$ 的窗口,该窗口就在图像 f 中滑动,对于窗口中 f 的部分区域 Ω ,中心像素就是 f_{ij} ,其他像素就是式中的 f_{xy} .由于该区域需要有中心像素,因此 A 与 B 都是奇数.通常可以设置 $A=B$,以方便计算.本实验中,设置 $A=B=11$.

式(5)中, σ^2 是伸缩常数,其越大,该权重的影响范围越大,距离越远的像素对当前像素的贡献越多.可以发现,周围像素 (x, y) 离中心像素 (i, j) 越近, f_{xy} 对 f_{ij}

的影响越大.在本实验中,采用 $\sigma^2=0.5$.能够平衡,对于 $A \times B=11 \times 11$ 的窗口,中心像素到边上的直线距离为 5 个像素,权重为 e^{-10} ,基本降低到 0 附近.

在 1.2 节中,阈值 T_h 的选择决定哪些边缘、强度多大的边缘参与后期的计算. Sobel 水平算子检测输入图 f_0 ,可以获得一幅梯度图像,一幅带有边缘信息的梯度图,在取绝对值之后,像素值范围为 $[0, 255]$.在该梯度图中,像素值越大,边缘强度越大.为了取得相对较强的边缘参与后期的运算,根据实验的测试,发现阈值 T_h 设置为最大值的 0.7 时,能够获得相对较好的结果.

在 1.3 节的步骤 2) 中,涉及到一个阈值 T_h ,还有结构元素的尺寸 R .由于 $M \in [0, 1]$, $T_h \in [0, 1]$;并且, T_h 越大,选择的区域就越小,越可能是潜在对焦准确区域,但是,这也会导致参与计算的边缘数量的减少而增加最后结果的随机性.因此, T_h 的选择需要适中,通过多次试验,发现 $T_h=0.8$ 时,可以获取较为稳定的结果.结构元素 mask 的参与,只是为了尽量包含边缘与附近区域,理论上 $R > 0$ 即可,且为方便计算一般为奇数. R 越大,则可能使得各个景物相连,这就无法区分出各自边缘 R 太小,则有可能没有覆盖整个边缘区域(尤其是有点模糊的情况),导致无法估计准确的边缘展宽;本文采用了 $R=9$,以保证覆盖整个边缘区域,计算时间也不长,为后面有效计算边缘展宽提供基础.

2.2 对比的方法

本文引入对比的方法包括峰值信噪比 (Peak Signal-to-Noise Ratio, PSNR), 结构相似度 (Structural Similarity, SSIM), 灰度平均梯度 (Gray Mean Gradient, GMG), 拉普拉斯算子和 (Laplacian Sum, LS), 前两者为参考型评价,后两者为无参考型评价.

PSNR 是最常用的算法之一.它衡量的是待评价图和参考图相应像素差异的平方和. PSNR 定义为

$$\text{MSE} = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (A_{ij} - B_{ij})^2$$

$$\text{PSNR} = 10 \log \left(\frac{255}{\text{MSE}} \right)^2 \quad (12)$$

式中, A 和 B 为 $M \times N$ 的原图像和待评价图像,根据上式可知, PSNR 评价值越大,待评价图与参考原图越相近,图像质量越好.

SSIM^[15] 主要由亮度 l , 对比度 c 与结构度 s 三部分构成,其指标定义为

$$\text{SSIM} = [l(A, B)]^\alpha [c(A, B)]^\beta [s(A, B)]^\gamma \quad (13)$$

式中的 α, β, γ 是表征亮度、对比度与结构信息相互权重的常数.通常,是局部计算的,其结果是一个矩阵,一般采用其均值作为一个评价结果 MSSIM. MSSIM 评价值的动态范围为 $[0, 1]$,越接近于 1 表示两图越相似,图像质量越好.

GMG 与 LS 定义为

$$GMG = \frac{1}{(M-1)(N-1)} \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=1}^{N-1} \sqrt{X}$$

$$X = \frac{[B(i+1, j) - B(i, j)]^2 + [B(i, j+1) - B(i, j)]^2}{2} \quad (14)$$

$$LS = \frac{1}{(M-2)(N-2)} \sum_{i=2}^{M-1} \sum_{j=2}^{N-1} |8B(i, j) - \sum B_{\Omega(i, j)}| \quad (15)$$

$\sum B_{\Omega(i, j)}$ 表示以 (i, j) 为中心的 3×3 像素邻域 Ω 的灰度和, 式中 M, N 是图像的高和宽. GMG 衡量的是图像梯度的强度, 越大, 说明边缘越锐利, 也就是图像清晰度高, 图像质量越好; LS 越大, 说明边缘越锐利, 也就是图像清晰度高, 图像质量越好.

因此, MSSIM, PSNR, GMG, LS 都是越大越好, 而本文方法越小越好.

2.3 主观实验的设计

对于图像的感知性能, 人类的主观评价是十分有效和重要的. 为印证本文方法的有效性, 设计主观对比实验.

根据国际电信联盟(International Telecommunication Union, ITU)对图像的感知质量的规则(ITU-R Rec. 500), 要求观察者将作品按照感知质量优劣排成等级, 分为 5 个等级, 如表 1.

表 1 主观评价的图像等级定义

Table 1 Definition for image rating of subjective evaluation

Rating	Degree for damage	Quality
5	Imperceptible	Excellent
4	Perceptible, not annoying	Good
3	Slightly annoying	Fair
2	Annoying	Poor
1	Very annoying	Bad

在本文中, 采用表 1 所述的主观评价图像等级定义方法, 对所有图像进行主观评价. 在具体实施中, 使用主观评价对比实验, 即每一幅待评价图像的旁边是参考的原始图像, 通过与原始图像对比, 对当前待评价图像进行打分评级.

该主观实验共有 20 人参加, 具体实验装置设计如图 3. 屏上显示对比的原始图像与待评价的图像, 通过

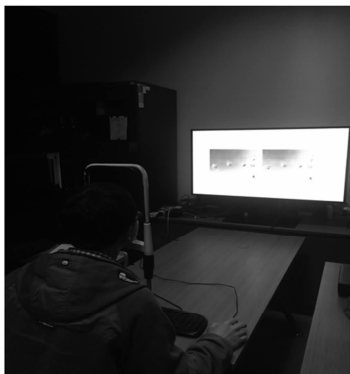


图 3 主观实验

Fig. 3 Subjective evaluation

对比, 让实验者进行评级打分. 通过 20 人对待评价图像评级后, 采用均值作为该图像的最终评级, 因此等级评分上会出现小数点. 评级分值在 1~5 之间, 分数越高, 图像的主观感知质量越好.

2.4 实验与分析

实验采用标准显微图像(matlab 软件自带的显微图像, 常用的显微图像例子)与实拍图像进行论证与测试.

图 4 为实拍显微图像的视觉注意索引图与潜在对焦区域提取结果. (a) 是原图, (b) 是采用 1.1 节方法获取的视觉注意索引图, (c) 是在 (b) 基础上采用阈值分割的结果, 而 (d) 是通过形态学膨胀处理之后获得的结果, 是二值化的清晰区域提取模板——非零区域即潜在对焦准确区域(主要是边缘). 根据主观对图 (a) 的观察, 与图 (d) 的比较, 可以发现, 图 (d) 的非零区域基本可以覆盖对焦准确区域的边缘. 从图 4 可以发现: 1) 原图中的对焦相对清晰的区域, 在图 (d) 中基本都被提取出来了, 在非对焦的细胞物体基本未被提取; 2) 提取结果, 与景物多少无关, 景物大小对结果无显著影响.

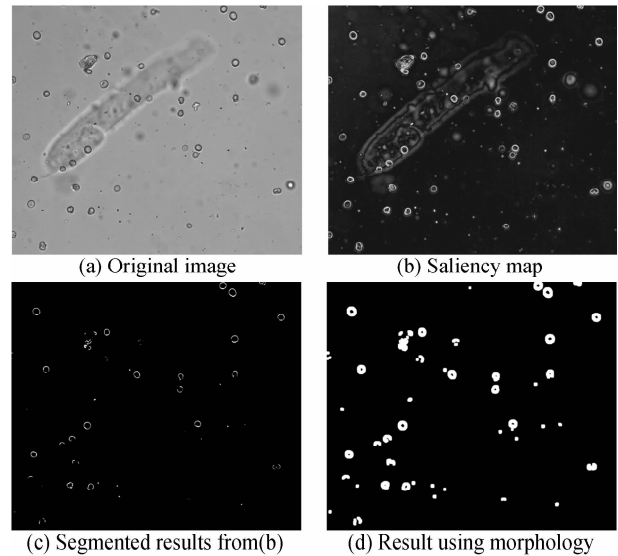


图 4 实拍显微图像的视觉注意索引图获取与潜在对焦区域提取

Fig. 4 Visual attention index map and potential focus areas extraction for microscopy image

针对图 5(a)所示的标准显微图像, 本文在其灰度基础上, 每隔灰度 5, 正负 5 档: 假设标准显微图灰度级别为 A , 则这些亮暗图像的灰度可简称为 $A-25, A-20, A-15, A-10, A-5, A, A+5, A+10, A+15, A+20, A+25$. 主客观评价的结果如表 2. 从主观视觉来看, 这点灰度的亮暗变化, 没有显著影响主观评价, 评级分数都在 4.5 以上, 介于评级 4 与评级 5 之间, 更接近评级 5, 说明其清晰度接近原始图像. 客观评价结果来看, 不同观察方法对不同亮度的评价结果影响不大,

参考型的 MSSIM 与 PSNR 的数值变化较大,可见这些评价方法的灵敏度高,与视觉感受有差距;而无参考型的 GMG、LS 与本文方法,变化不明显,较为符合主观观察的结果.这也证明照片曝光亮暗不会显著影响本文方法的评价结果.

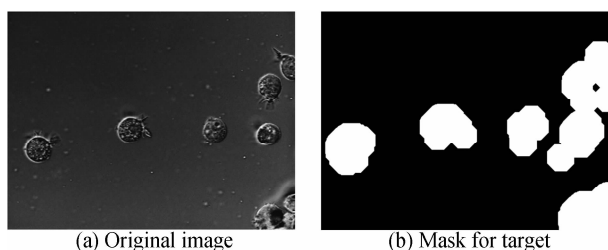


图 5 采用标准显微图像以及对焦清晰区域提取的人工模板

Fig. 5 The standard microscopy image and the corresponding artificial template for focus area

表 2 各种方法对不同亮度图像的评价结果

Table 2 Evaluation results using different methods

Methods/ Images	MSSIM	PSNR	GMG	LS	Ours	Subjective rating
A-25	0.91	20.17	3.87	19.49	5.89	4.6
A-20	0.94	22.11	3.88	19.49	5.91	4.8
A-15	0.97	24.60	3.88	19.50	5.91	4.8
A-10	0.98	28.13	3.88	19.50	5.91	4.9
A-5	0.99	34.15	3.88	19.50	5.91	5
A	1	Inf	3.88	19.50	5.90	5
A+5	0.99	34.15	3.88	19.50	5.89	5
A+10	0.99	28.13	3.88	19.50	5.89	5
A+15	0.98	24.60	3.88	19.49	5.89	4.8
A+20	0.97	22.11	3.87	19.49	5.89	4.6
A+25	0.95	20.17	3.87	19.49	5.89	4.6

分析对焦区域与非对焦区域的离焦模糊变化分别对评价结果的影响.采用的标准显微图像如图 5(a),本文使用的对焦清晰区域提取的人工模板如图 5(b),图(b)中,为零的区域为对非零区域(即白色区域)为对焦相对清晰区域,而为零的区域(黑色区域)为对焦不清晰区域.实验中,对不同区域使用不同程度的模糊手段进行退化.采用高斯模糊来仿真离焦模糊,高斯模糊涉及到两个参数,模糊半径 r 与偏差 δ .通过这两个参数的变化,得到不同退化的图像,并进行评价,获得数据.

采用两组对比,第一组:只对非对焦区域进行模糊退化,采用 $r=3, r=9, \delta$ 从 1 到 5 间隔为 1 变化;第二组:只对对焦区域进行模糊退化,采用 $r=3, r=9, \delta$ 从 1 到 5 间隔为 1 变化.

第一组数据结果如图 6,其中(a) $r=3, \delta=1$, (b) $r=9, \delta=5$.利用各评价方法评估所得的数据如表 3 与表 4,包括客观方法与主观评级.通过主观评级,发现在这种情况下,图像的主观评级都很高,接近于原始图

像.从图 6 分析,根据主观视觉观察,两图清晰度相当,因为人们只对清晰目标感兴趣,显微镜需要细节成像的也只是相对对焦清晰的目标.通过仔细观察,可以发现,非对焦区域确实更模糊了,但不影响观察.在模糊半径 r 与偏差 δ 变化的时候,可以得到相应的退化图像.事实上,这种只对非对焦区域模糊退化的类型,从主观观察的角度看其清晰度变化不显著;而根据客观评价结果,只有本文方法做到了与主观评价的一致,尤其是在表 4.本文方法能做到主客观一致的原因在于其主要针对对焦相对准确区域进行评价与衡量.

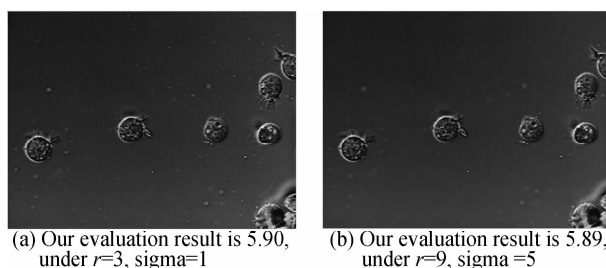


图 6 不同模糊半径,不同模糊偏差下,非对焦区域模糊、对焦区域清晰的图像

Fig. 6 Images under different blur radius and deviation, the focus areas is set sharp while region of out of focus is set blurring

表 3 $r=3, \delta$ 变化,只对非对焦区域模糊的图像评价结果

Table 3 Evaluation results, the images are under different deviation δ and blur radius $r=3$, region of out of focus is blurring

Methods/ δ	MSSIM	PSNR	GMG	LS	Ours	Subjective rating
$\delta=1$	0.96	43.33	2.51	10.56	5.90	5
$\delta=2$	0.95	42.29	2.46	10.44	5.90	5
$\delta=3$	0.95	42.08	2.46	10.51	5.90	4.9
$\delta=4$	0.95	42.01	2.46	10.53	5.90	4.9
$\delta=5$	0.95	42.00	2.46	10.53	5.90	4.8

表 4 $r=9, \delta$ 变化,只对非对焦区域模糊的图像评价结果

Table 4 Evaluation results, the images are under different deviation δ and blur radius $r=9$, region of out of focus is blurring

Methods/ δ	MSSIM	PSNR	GMG	LS	Ours	Subjective rating
$\delta=1$	0.95	42.39	2.32	9.65	5.89	5
$\delta=2$	0.92	39.68	1.95	8.45	5.89	4.9
$\delta=3$	0.91	38.91	1.88	8.24	5.89	4.9
$\delta=4$	0.91	38.63	1.87	8.22	5.89	4.8
$\delta=5$	0.91	38.50	1.86	8.23	5.89	4.8

第二组数据结果如图 7,其中(a) $r=3, \delta=1$, (b) $r=9, \delta=5$.利用各评价方法评估所得的数据如表 5 与表 6,包括主观评级与客观评价结果.从典型结果观察,两图清晰度差距大,因为人们只对清晰目标感兴趣,那些原本清晰的目标模糊后,导致主观评价值下降.但仔细观察,可以发现,非对焦区域基本没有变化,

但图像却极大地影响了人们的观察目的. 在模糊半径 r 与偏差 δ 变化时,可以得到相应的退化图像. 事实上,这种只对对焦区域进行模糊退化的类型,从主观观察来看其清晰度变化极大;而根据评价结果,只有本文方法做到与主观评价一致的结果.

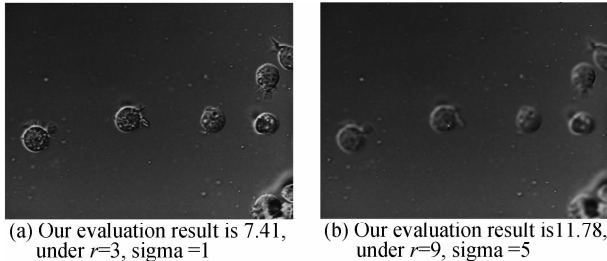


图 7 不同模糊半径,不同模糊偏差下,对焦区域模糊、非对焦区域清晰的图像

Fig. 7 Images under different blur radius and deviation, the focus areas is set blurring while region of out of focus is set sharp

表 5 $r=3$, δ 变化,只对对焦区域模糊的图像评价结果

Table 5 Evaluation results, the images are under different deviation δ and blur radius $r=3$, only focus area is set blurring

Methods/ δ	MSSIM	PSNR	GMG	LS	Ours	Subjective Rating
$\delta=1$	0.99	40.48	3.41	16.32	7.41	4.4
$\delta=2$	0.99	39.29	3.37	16.08	7.56	3.8
$\delta=3$	0.99	39.10	3.36	16.05	7.58	3.2
$\delta=4$	0.99	39.03	3.36	16.04	7.61	2.8
$\delta=5$	0.99	39.00	3.36	16.04	7.67	2.1

表 6 $r=9$, δ 变化,只对对焦区域模糊的图像评价结果

Table 6 Evaluation results, the images are under different deviation δ and blur radius $r=9$, only focus area is set blurring

Methods/ δ	MSSIM	PSNR	GMG	LS	Ours	Subjective Rating
$\delta=1$	0.99	37.72	3.26	15.61	7.88	4.1
$\delta=2$	0.96	32.05	2.88	14.07	10.12	3.5
$\delta=3$	0.94	30.52	2.77	13.74	11.54	2.9
$\delta=4$	0.94	29.98	2.74	13.68	11.60	2.2
$\delta=5$	0.94	29.74	2.72	13.68	11.78	1.6

此外,进一步用典型图像进行对比. 在 $r=9, \delta=5$ 时,第一组结果如图 6 (b), $MSSIM=0.91$, $PSNR=38.50$, $GMG=1.86$, $LS=8.23$, 本文方法 $=5.89$; 而第二组结果如图 7 (b), $MSSIM=0.94$, $PSNR=29.74$, $GMG=2.72$, $LS=13.68$, 本文方法 $=11.78$. 从主观视觉来看,图 7 (b) 的清晰度比图 6 (b) 差,而根据评价结果,只有 PSNR 和本文方法符合.

3 结论

本文针对显微图像清晰度评价,提出了一种符合主观评价的客观评价手段. 结合视觉注意机制与边缘展宽衡量的评价方法,利用空间像素灰度差距实现视

觉注意索引图的获取,模拟人眼以赋予不同区域与像素不同的权重,通过分割提取潜在对焦区域;利用边缘展宽方法衡量这些区域,以水平与垂直方向的平均边缘展宽作为最后的清晰度指标. 根据实验与对比方法的比较,数据表明,本文方法能够实现与主观一致的评价. 这种无参考式的显微图像清晰度评价方法,能够辅助判别显微镜成像质量,也可应用于数字显微镜的自动对焦.

参考文献

- [1] SUN Y, DUTHALER S, NELSON B J. Autofocusing algorithm selection in computer microscopy [C]. IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2005.
- [2] 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.
- [3] RUDNAYA M E, MATTHEIJ R, MAUBACH J. Evaluating sharpness functions for automated scanning electron microscopy[J]. *Journal of Microscopy*, 2010, **240**(1): 38-49.
- [4] İLHAN H A, DOGAR M, ÖZCAN M. Digital holographic microscopy and focusing methods based on image sharpness [J]. *Journal of Microscopy*, 2014, **225**(3): 138-149.
- [5] VIKRAMADITYA B. Micromanipulation using self assembly strategies[D]. University of Minnesota, 2001.
- [6] FENG Hua-jun, TAO Xiao-ping, ZHAO Ju-feng, et al. Review and prospect of image restoration with space-variant point spread function[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, **36**(1): 1-7.
冯华君,陶小平,赵巨峰,等. 空间变化 PSF 图像复原技术的研究现状与展望[J]. *光电工程*, 2009, **36**(1): 1-7.
- [7] BRENNER J F, DEW B S, HORTON J B, et al. An automated microscope for cytologic research a preliminary evaluation. [J]. *Journal of Histochemistry & Cytochemistry*, 1976, **24**(1): 100-111.
- [8] WANG Jian, CHEN Hong-bin, ZHOU Guo-zhong, et al. An improved brenner algorithm for image definition criterion [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(7): 855-858.
王健,陈洪斌,周国忠,等. 改进的 Brenner 图像清晰度评价算法[J]. *光子学报*, 2012, **41**(7): 855-858.
- [9] CAO Mao-yong, SUN Nong-liang, YU Dao-yin. Digital image evaluation function based on gray gradient[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2003, **30**(4): 69-72.
曹茂永,孙农亮,郁道银. 基于灰度梯度的数字图像评价函数[J]. *光电工程*, 2003, **30**(4): 69-72.
- [10] JAWERTH B, SWELDENS W. An overview of wavelet based multiresolution analyses[J]. *SIAM Review*, 1994, **36**(3): 377-412.
- [11] CHEN Jian, ZHENG Shao-hua, PAN Lin, et al. Auto focusing method for fundus camera [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(11): 1110001.
陈健,郑绍华,潘林,等. 眼底照相机自动调焦算法[J]. *光子学报*, 2014, **43**(11): 1110001.
- [12] HASSEN R, WANG Z, SALAMA M M. Image sharpness assessment based on local phase coherence [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2013, **22**(7): 2798-2810.
- [13] VU P V, CHANDLER D M. A fast wavelet-based algorithm for global and local image sharpness estimation[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2012, **19**(7): 423-426.
- [14] ZHAO Ju-feng, FENG Hua-jun, Xu Zhi-hai, et al. Image quality assessment based on blurring and noise level[J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2010, **21**(7): 1062-1066.
赵巨峰,冯华君,徐之海,等. 基于模糊度和噪声水平的图像质量评价方法[J]. *光电子·激光*, 2010, **21**(7): 1062-1066.
- [15] WANG Z, BOVIK A C, SHEIKH H R, et al. Image quality assessment: From error visibility to structural similarity[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, **13**(4): 600-612.