

结合物镜测试的梯度约束显微成像质量提升方法

黄奕龙¹, 赵巨峰¹, 张克奇², 华玮平¹, 崔光茫¹

¹杭州电子科技大学电子信息学院, 浙江 杭州 310018;

²宁波永新光学股份有限公司, 浙江 宁波 315040

摘要 光学显微数码成像系统中,光学退化是影响图像质量的重要因素。结合物镜测试,提出了一种结合分视场点扩散函数估计的梯度约束显微图像复原方法,并应用于显微镜以形成质量提升系统。通过物镜调制传递函数测试,分视场计算获取点扩散函数;引入零阶范数梯度约束作为正则化项,设计基于该约束的快速复原方法;并采用渐变加权拼接方法实现分视场复原结果的无缝拼接。对不同物镜下的显微图像进行了复原测试,并采用评价方法进行评估。结果表明,本文方法给出的显微图像复原效果好、运行速度快,对尺寸为 2048 pixel×1536 pixel 的图像只需 1.62 s,适用于显微成像系统。

关键词 图像处理; 图像复原; 显微成像; 梯度约束; 视场

中图分类号 TP391; TN911.73 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.111001

Gradient Constrained Microscopic Imaging Quality Improvement Method with Objective Lens Measurement

Huang Yilong¹, Zhao Jufeng¹, Zhang Keqi², Hua Weiping¹, Cui Guangmang¹

¹Electronics and Information College, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China;

²Ningbo Yongxin Optics Limited Company, Ningbo, Zhejiang 315040, China

Abstract Optical imaging degradation is one of the most important factors for image quality in digital optical microscopic imaging. Combined with the digital microscopic imaging system and optical objective lens measurement, a fast gradient constrained restoration method is proposed based on point spread function estimation under different fields. By measuring the modulation transfer function of objective lens, the point spread function is obtained with different fields. A novel restoration approach is designed with the L0 gradient constraint as a regularized term. Meanwhile, the weight image stitching method is designed for the restoration of multiple fields. The image data with different objective lens are tested, and the evaluation methods are used for assessing the results. The results show that the gradient constrained microscopic imaging quality improvement method with the objective lens measurement is suitable for microscopic imaging system for its good restored effect and high computational efficiency, it takes only 1.62 s for the image size of 2048 pixel×1536 pixel.

Key words image processing; image restoration; microscopic imaging; gradient constraint; field of view

OCIS codes 100.2000; 170.0110; 100.3010

1 引言

显微成像退化不可避免,提升成像质量非常重要。显微成像质量主要受光学系统退化和在低光子流下测量导致了噪声这两个因素影响。光学系统退化可用空间变化点扩散函数(PSF)来表征。对于高质量显微图像的旺盛需求促使研究者致力于模糊的有效补偿和噪声的抑制,即复原技术的研究,并将其作为后处理手

收稿日期: 2017-04-15; **收到修改稿日期:** 2017-05-29

基金项目: 国家自然科学基金(61405052)、浙江省科技计划项目(2017C01033)

作者简介: 黄奕龙(1995—),男,本科生,主要从事光学成像方面的研究。E-mail: 908172521@qq.com

导师简介: 赵巨峰(1985—),男,博士,副教授,主要从事计算成像方面的研究。

E-mail: dabaozjf@hdu.edu.cn(通信联系人)

段应用于显微成像硬件系统。

图像复原等同于反卷积过程^[1]。研究中设计了诸多方法模型^[2-3],可分为:1) 代数复原法,如最小二乘法;2) 统计法,如贝叶斯模型等;3) 分析复原手段,如常见的变分法,以及衍生出的多方法、多特征组合的混合模型。为从数学理论上求解,反卷积问题被转变为能量最小化方程,通过图像统计与迭代求解相结合获得最优解。基于噪声泊松分布的假设,RL(Richardson-Lucy)算法采用最大似然估计算法,其本质为贝叶斯模型^[4-5]。经典的全变分(TV)算法也是常见的复原手段^[6]。陶小平等^[7]针对遥感成像 PSF 实际空间的变化,进行了分块复原研究;成于思等^[8]基于梯度,在传统最大后验概率思路基础上,结合 TV 正则化项进行显微图像复原;Levin 等^[9]提出利用图像先验知识的方法。在这些方法中,通常需估计 PSF^[10]。一般通过辅助设备获取,如 1) 采用调制传递函数(MTF)测试仪测试^[11],设定特殊曝光时间^[12]或者辅助高速相机^[13]等来获取模糊路径;2) 通过估计相机在拍摄时的加速度及角速度,分析模糊情况^[14];3) 同一场景多帧图^[15]、长短曝光结合^[16]等估计退化 PSF。显微 PSF 研究方面,通过对 PSF 的测量,实现基于能量分布系统的 3D-PSF 选取^[17]。盲复原的突破性工作于 2006 年由 Fergus 实现,采用基于梯度统计概率分布及参数估计的方法,取得了较好的结果^[18],但存在计算速度慢,对大尺寸、空变 PSF 无效等问题。Shan 等^[19]设计了紧框架,并结合稀疏特性与边缘约束实现复原,降低了振铃效应,但计算速度慢、参数复杂。

结合于显微系统的后处理复原方法,需满足效果和速度两方面要求,实现既能提升分辨能力,又可短时间内计算的目的。传统方法存在两个问题:1) 基于单幅图像的盲复原是从图像或者一些显微镜的先验知识来估计 MTF 或者 PSF,耗时多;2) 物镜对应的退化 PSF 随空间变化,但常规方法只采用单一的退化因子,会降低复原结果的分辨能力。

根据显微镜厂商与其研究机构的经验分析,鉴于物镜 MTF 可预先测试存储,只需从 MTF 估计 PSF 即可结合非盲复原快速实现复原目标。同时,结合物镜分视场的 MTF 测试,获取分视场的 PSF,并以零阶(L0)范数约束为基础设计梯度约束的复原方法,加权渐变拼接实现不同视场获取完整清晰显微图像的目的。

2 显微成像装置与物镜分视场 PSF 获取

2.1 数码显微成像系统

数码显微成像系统包括光学、硬件及软件等模块。光学部分使物体成像;硬件指电子目镜系统,采用 CMOS 传感器记录数字图像;软件部分对图像进行校准、测量等操作,获得所需的图像数据。图 1 为宁波永新光学所产的一款数码显微系统,也是实验改造与方法应用的对象。

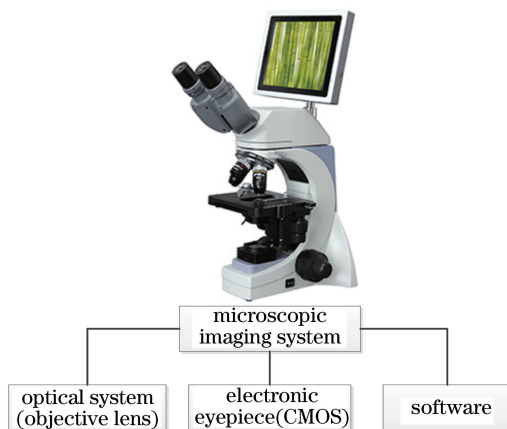


图 1 数码显微成像系统

Fig. 1 Digital microscopic imaging system

物镜退化函数 PSF 是呈中心对称的,在频域上即为 MTF。图 2 为永新所产 4×物镜的 MTF 曲线,图中视场角 W 为 10° ,Tan 为子午面,Sag 为弧矢面。由图 2 可知,随着频率升高,可以通过物镜的信息逐渐减少,在 $100 \text{ lp}\cdot\text{mm}^{-1}$ 处中心视场 MTF 已小于 0.2,边缘视场已小于 0.1;而 CMOS 的可接收信号频率($2.2 \mu\text{m}$ 的像元)

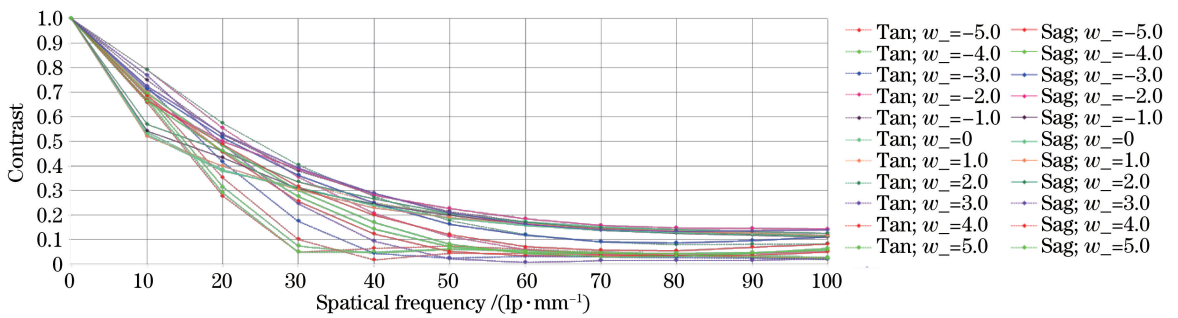


图2 永新光学所产物镜的MTF曲线

Fig. 2 MTF curves of objective lens made by Yongxin Optics

高于 $100 \text{ lp}\cdot\text{mm}^{-1}$ 。可见,由于光学物镜限制,导致图像高频信号丢失,最终造成图像退化。

数码显微系统具有功能强大的处理器与软件集成系统,可以通过算法补偿整合于软件后处理中以补偿光学系统的退化。通过测试物镜 MTF 数据,构建图像的 PSF 即反卷积因子,设计合理的图像复原方法,实现图像优化与补偿,弥补硬件上的缺憾。

2.2 物镜 MTF 测试与 PSF 获取

测量 MTF 的方法有多种,包括点源测试法、线测试法、边缘测试法等。采用 Trioptics 光学传函仪测试物镜 MTF,该仪器发散角为 10° (全角)。在 632.8 nm 的红光下用干涉的方法测量系统的 MTF,针对 -5 对红光下视场、子午和弧矢平面,每间隔 1 面进行测试。

通过数据分析,提取不同视场的 MTF,并计算对应的 PSF。MTF 是在物理空间测量的,而所需 PSF 在图像空间,因此必须涉及到转换问题。以中心视场为例,选择中心视场下的子午与弧矢的 MTF($N \times 1$),首先根据成像传感器 CMOS 的采样频率对 MTF 数据进行插值以满足频率单位的匹配(从 MTF 测试频率对应到像素频率);其次,将两个 MTF 在频率域进行乘积,获取二维 MTF($N \times N$);最后,变换到空域并截取中心不为零的矩形区域,从而获得 PSF。此时的 PSF 是基于像素的,可直接应用于显微图像反卷积复原。

3 梯度约束显微图像快速复原方法

光学成像是线性移不变过程,利用循环矩阵模型^[1],输入和输出之间的数学模型可表示为矩阵-向量关系:

$$g = \mathbf{B}f + n, \quad (1)$$

式中 g 为观测图, f 为待求清晰图,对应真实场景, \mathbf{B} 为退化矩阵,对应于 PSF b , n 为噪声。图像复原,即已知观测图像 g ,通过估计的 b ,抑制 n ,求取最优的 f 。

结合(1)式,设计惩罚代价函数 E ,寻找使其取极小值时对应的 f 。则 E 可表示为

$$E = \|g - \mathbf{B}f\|^2 + \lambda J(f), \quad (2)$$

式中 λ 为正则化因子, $J(f)$ 为正则化项,常用 L2 范数。显微图像细节丰富,噪声易压制细节,因此考虑抗噪性能,鉴于 L0 范数在图像平滑上的优异表现,引入 L0 范数正则化项:

$$J(f) = \#\{p \mid \partial f_p \neq 0\}, \quad (3)$$

对于 f 中的像素 p , $\partial f_p = |\partial_x f_p| + |\partial_y f_p|$, $\partial_x = [1 \ -1]$, $\partial_y = [1 \ -1]^T$ 分别为宽度与高度方向的一阶微分算子。 $J(f)$ 统计的是图像中一阶梯度不为零像素的数量,即符号 $\#$ 的作用。

涉及到 L0 范数优化,于是引入参考变量(h, v)作一些近似,惩罚代价函数更新为

$$E = \|g - \mathbf{B}f\|^2 + \lambda J(h, v) + \beta (\|\partial_x f - h\|^2 + \|\partial_y f - v\|^2), \quad (4)$$

式中 h, v 分别为对应于 $\partial_x f, \partial_y f$ 的变量, $J(h, v) = \#\{p \mid |h_p| + |v_p| \neq 0\}$ 。 β 可平衡调节(h, v)与($\partial_x f, \partial_y f$)的相似性,通过这个近似,可通过交替迭代优化(h, v)和 f 求解。

3.1 (h, v)的优化

(h, v)能通过最小化惩罚函数 E_1 得到,即

$$E_1 = \frac{\lambda}{\beta} J(h, v) + (\|\partial_x f - h\|^2 + \|\partial_y f - v\|^2). \quad (5)$$

通过推导综合(5)式, (h, v) 可逐个像素分析而加速计算, 于是 E_1 可改写为

$$E_1 = \sum_p \left[\frac{\lambda}{\beta} \Psi(|h_p| + |v_p|) + (\partial_x f_p - h_p)^2 + (\partial_y f_p - v_p)^2 \right], \quad (6)$$

式中 $\Psi(|h_p| + |v_p|)$ 为二值函数, 即非 1 即 0。若 $|h_p| + |v_p| = 0$ 则 $\Psi(|h_p| + |v_p|)$ 为 0, 于是, 式的解为

$$(h_p, v_p) = \begin{cases} (0, 0), & (\partial_x f_p)^2 + (\partial_y f_p)^2 \leq \frac{\lambda}{\beta}. \\ (\partial_x f_p, \partial_y f_p), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

根据(7)式, 可通过逐个像素单独、高效计算 (h, v) 。

3.2 f 的优化

对应原始场景的待求清晰图 f 能通过最小化惩罚函数 E_2 得到, 即

$$E_2 = \|g - \mathbf{B}f\|^2 + \beta(\|\partial_x f - h\|^2 + \|\partial_y f - v\|^2). \quad (8)$$

通过设计 $\partial E_2 / \partial f = 0$, 由

$$[\mathbf{B}^T \mathbf{B} + \beta(\partial_x^T \partial_x + \partial_y^T \partial_y)] f = \mathbf{B}^T g + \beta(\partial_x^T h + \partial_y^T v), \quad (9)$$

直接利用快速傅里叶变换, 可快速求解 f 。

4 分视场方法

由图 2 可知, MTF 随着空间视场变化而变化: 中心与边缘视场的 MTF 分布差异很大。如果采用单一 PSF 进行复原, 将导致局部过度复原或复原不足。因此, 提出分视场复原法, 即将显微图像分视场处理, 对不同的视场区域分别复原, 然后将各视场结果拼接得到完整的复原图像。分视场复原法已应用于遥感成像处理^[7], 但显微图像处理方面涉及较少。分视场复原法可以高效利用各部分的局部信息, 不要求可解析的空间变化的 PSF 表达式, 也避免了海量存储和计算, 其缺点在于子区域之间往往存在一定的拼接缝, 如何消除拼接缝是一项重要的技术。

显微成像系统以径向对称退化为主, 如图 3(a)所示, 将圆环形分割为 3 个视场进行分视场处理。虽然分视场的图像复原可以使显微图像的各部分清晰度提升, 但是不同视场的边缘区域会产生振铃。于是, 将不同视场边界外延, 使邻近视场有一定区域像素的重叠, 该区域足够宽, 使边界振铃也分布其中。该重叠区域如图 3(a)的深蓝色区, [1]~[3]分别对应于 3 个视场 PSF1~3 退化的区域, [4]为视场[2]与[3]的重叠区域。

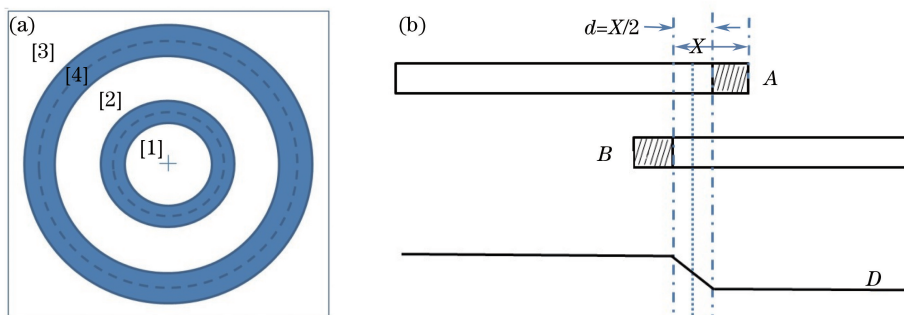


图 3 分视场示意图。(a)分视场与重叠区域;(b)重叠区域与拼接的一维层面示意图

Fig. 3 Sketch map for field of view. (a) Fields of view and overlap region;

(b) one-dimensional sketch map of overlap region and splicing

重叠区域必须进行精细化拼接, 以避免信息的剧烈变化, 渐变加权系数拼接方法非常适合该需求。如图 3(b)所示, 以一维方向上的重叠为例, 阴影表示潜在的振铃分布区域: 设相邻两个视场的图像为 A (尺寸为 M pixel)、 B (尺寸为 N pixel) 拼接为 D , 重叠区域边界延伸 X pixel, 即重叠区左侧边界处于 A 的第 $M -$

X 列, 右侧边界位于 B 的第 X 列(X 与 PSF 尺寸相同)。复原之后, 去除了包含潜在振铃的 $X/2$ 列, 则剩下的重叠宽度 $d = X/2$, 此时, 重叠右侧边界在 A 的 $M - d$ 列, 左侧边界位于 B 的 d 列。图像重叠区以中心 $1/(2d)$ 为分界线, 对于宽度为 d pixel 的重叠区域, 从左侧到右侧 k 取值为 $1 \sim d$, 得到:

$$D_k = A_k \times \left(1 - \frac{k}{2d}\right) + B_k \times \frac{k}{2d} \quad (10)$$

针对分视场复原的处理, 先用 Lena 图进行仿真测试。图 4 为原图以及空间变化 PSF 的仿真图像, 退化函数 PSF1~3, 模糊程度依次递增, 图 4(a) 为原图, 图 4(b) 为圆环形 3 视场退化模糊图像。



图 4 分视场拼接分析。(a)原图;(b)圆环形分视场模糊图像;(c)加权拼接复原结果;(d) PSF1 复原结果;
(e) PSF2 复原结果;(f) PSF3 复原结果

Fig. 4 Image stitching with the fields of view. (a) Original image; (b) circular fields of view of blurred image;
(c) weighted splicing result; (d) restored result with PSF1; (e) restored result with PSF2; (f) restored result with PSF3

仅用单一退化 PSF 恢复整幅图像, 图 4(d)~(f) 为分别仅用 PSF1、PSF2 或 PSF3 进行复原。图 4(d) 的外围依旧模糊, 表明复原程度不够; 图 4(f) 中心区域出现伪信息, 表明复原过度。将图像以分视场复原并加权拼接[图 4(c)], 不同视场图像的清晰度均有所提高, 抑制了振铃效应, 分视场之间的边界过渡也相对平滑。上述结果表明分视场复原的有效性, 可以解决显微图像固有的不同视场具有较大成像差异的问题。

5 实验结果与分析

5.1 实验说明

对于复原, 利用(7)式和(9)式迭代求取。根据经验, 需要迭代 5~10 次。在参数设置时, 初始系数 β_0 固定为 2λ , 每一次迭代系数 β_i 是变化的。 $\beta_i = \mu\beta_{i-1}$, 式中 μ 为伸缩系数, 取值范围为 $[2 \ 4]$ 。 β_i 变大则效率变高、效果变差, 反之则相反。需要调整的主要实验参数为正则化因子 λ , λ 的经验取值范围为 $[0.001 \ 0.1]$ 。实验结果表明, 大 λ 会导致复原不足而显得平滑, 小 λ 会导致复原过度而引入大量噪声与振铃效应。在分视场中, 根据显微图像的处理经验, 重叠区域为 25~50 pixel, 去除振铃区的 10~20 pixel, 对余下部分进行拼接。

所用显微镜见图 1, 采用了 3 套 4×物镜, 分别为 Nikon e100 4×, Olympus 4×与 Novel 4×(sw82)。CMOS 分辨率为 300 万像素(2048 pixel×1536 pixel), 像元尺寸 2.2 μm 。实验物体主要为: 1) 鉴别率板, 约为 300 $\text{lp}\cdot\text{mm}^{-1}$; 2) 树木切面, 对象为椴树年轮; 3) 茎的横切, 对象为木本双子叶植物。

采用 Matlab R2009b 编程实现算法, 计算硬件配置: CPU 为 2.7 GHz; 内存为 2 GB。对比方法有 RL 方法^[4-5]、TV 法^[6]和文献^[9]方法。这些复原方法的参数可以调至最佳。

此外, 引入 3 种图像客观评价指标以衡量评估复原结果: 1) 结合视觉注意机制与边缘展宽衡量的显微

图像清晰度评价指标^[20],即视觉清晰度(VP);2)灰度平均梯度(GMG)与拉普拉斯和(LS)^[20]。VP值越小,则待评价图像质量越好;GMG和LS值越大,则待评价图像质量越好。

5.2 结 果

图5为Nikon e100 4×物镜拍摄的图像(2048 pixel×1536 pixel)及其中心区域局部放大图(500 pixel×400 pixel)。由图5可知,由于光学系统的退化,使得图像存在一定的模糊。细胞的边缘相对被弱化,细节的信息弥散,对比度稍差。图6为Nikon e100 4×物镜在不同视场的PSF对比,包括0°,2°,4°视场,可以发现越到边缘视场,PSF退化越剧烈。

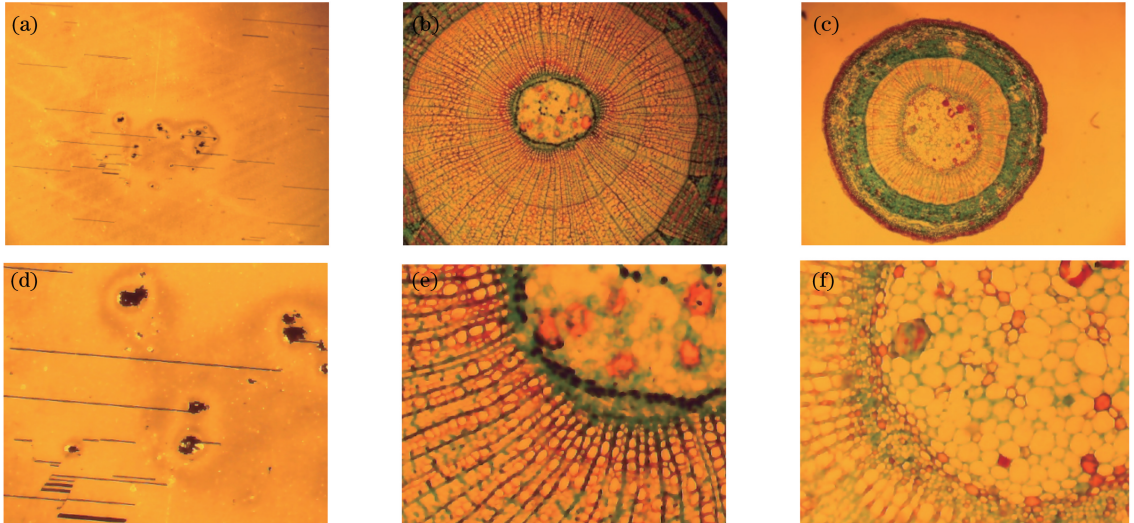


图5 Nikon e100 4×物镜拍摄的图像及其中心区域局部放大图。(a) 300 lp·mm⁻¹鉴别率板;(b) 椴树年轮切面;(c) 木本双子叶植物茎横切;(d)图(a)局部放大;(e)图(b)局部放大;(f)图(c)局部放大

Fig. 5 Images captured by Nikon e100 4×, and their local zoom of central area. (a) Discrimination plate of 300 lp·mm⁻¹; (b) section of linden tree ring; (c) crosscutting for stems woody dicotyledonous plants; (d) local zoom of Fig. (a); (e) local zoom of Fig. (b); (f) local zoom of Fig. (c)

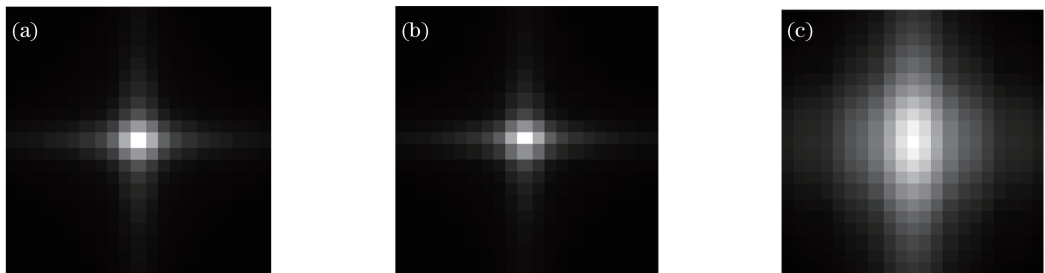


图6 Nikon e100 4×物镜不同视场PSF对比。(a) 0°中心视场PSF;(b) 2°视场PSF;(c) 4°视场PSF

Fig. 6 Comparison of PSF of different fields for Nikon e100 4×. (a) PSF of 0° central field; (b) PSF of 2° field; (c) PSF of 4° field

图7为不同方法复原的结果,图7(a)~(d)分别为采用RL法、TV法、文献[9]方法和本文方法得出的结果。从300 lp·mm⁻¹鉴别率板复原结果分析,TV法的结果较为平滑,RL法和文献[9]方法结果噪声放大明显,而本文方法在复原的同时相对抑制了噪声。观察椴树年轮切面图与木本双子叶植物茎横切图的复原处理,TV法相对更平滑,细节损失多,其他方法都能实现细节的复原。但在噪声与振铃等效应的抑制方面,本文方法相对更佳,该方法一方面使得细胞等结构棱角分明,另一方面有效抑制细胞这类结构中较为平滑区域的噪声与振铃效应。

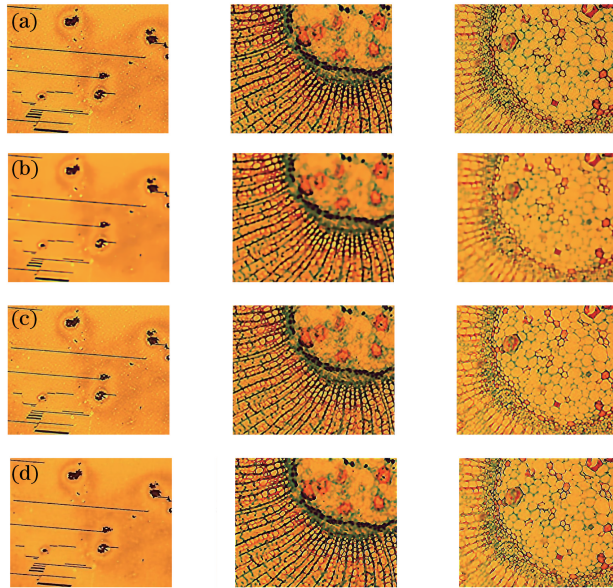


图 7 不同方法的复原结果。(a) RL 方法复原结果;(b) TV 方法复原结果;
(c) 文献[9]方法复原结果;(d) 本方法的复原结果

Fig. 7 Restored results using varied methods. (a) Results of RL method ;
(b) results of TV method ; (c) results of Ref. [9] method ; (d) results of proposed method

5.3 图像评价及运算速度分析

在主观观察分析的基础上,进一步用客观评价方法衡量复原方法的优劣,并且在运算速度上进行比较分析。

图 4 的视觉结果表明,仅用单一退化 PSF 恢复整幅图像效果不如分视场复原效果。表 1 的客观评价结果表明,VP 值越小,图像质量越好;GMG 和 LS 值越大,图像质量越好。根据评价结果,图 4(c)~(f)都比退化图 4(b)有所提升,其中图 4(c)表现最佳,其 VP 值小,GMG 与 LS 值大,表明分视场复原拼接方法的有效性。

表 1 图 4 的客观评价价值比较

Table 1 Comparison of the objective evaluation index for Fig.4

Evaluation index	Fig.4 (a)	Fig.4 (b)	Fig.4 (c)	Fig.4 (d)	Fig.4 (e)	Fig.4 (f)
VP	3.20	6.10	3.10	4.60	3.80	3.30
GMG	11.92	8.78	15.10	9.82	11.42	12.86
LS	56.59	33.35	76.53	41.11	52.32	61.38

根据前述数码显微成像系统提到的 Nikon e100 4×物镜的实验结果,利用 VP 法、GMG 法与 LS 法进行评价,对采用同一种方法复原的 3 张图像评价结果取均值,结果如表 2 所示。可见,VP 值越小,图像质量越好;GMG 及 LS 的值越大,图像质量越好。根据评价结果可知,本文方法表现最佳,其 VP 值小,GMG 与 LS 值大。

表 2 不同复原方法的客观评价价值比较

Table 2 Comparison of the objective evaluation index by different restoration methods

Evaluationindex	Restoration method			
	RL	TV	Ref.[9]	Proposed
VP	4.54	7.92	5.01	2.71
GMG	15.47	13.40	14.21	15.61
LS	74.48	54.91	62.87	87.31

对于 2048 pixel×1536 pixel 尺寸的图像,不同复原方法的平均运行速度不同,RL 法、TV 法、文献[9]方法和本文方法的平均运行速度分别为 32.56,21.77,46.81,1.62 s。基于 L0 范数梯度约束的快速图像复原方法运行速度仅为 1.62 s,远远快于其他方法,也比较适用于数码显微镜的快速成像优化。

5.4 综合分析

上述实验与分析主要是针对 Nikon e100 4×镜头。另外,还采用 Olympus 4×与 Novel 4×(sw82)两套物镜进行了相同的实验,并获取数据进行复原处理。3套物镜的复原结果客观评价指标的平均值如表3所示。结果表明,与其他复原方法相比,本文方法的评价价值更佳,更适用于显微图像的复原,在速度上也适用于显微成像系统复原。

表3 3套物镜不同复原方法的平均客观评价价值

Table 3 Comparison of the average objective evaluation index by different restoration methods with three cameras

Evaluation index	Restoration method			
	RL	TV	Ref.[9]	Proposed
VP	4.68	8.26	5.92	2.82
GMG	14.59	13.27	13.73	15.48
LS	72.65	54.91	59.49	84.97

本文方法适用于显微成像系统的复原,主要表现在:1)速度快,结合像素单独高效计算与快速傅里叶变换及频率域计算,运算效率较高,可结合到显微系统的后处理中;2)有效抑制振铃,显微图像细节区域非常细致,即高频信号强,复原的振铃效应较为明显。文献报道表明,L0范数可以有效平滑边缘,即保持边缘平滑平坦区域,正是鉴于L0范数的这一优势,本文方法可以有效实现显微图像复原中振铃的抑制。

6 结论

由于光学物镜、电子目镜的固有缺陷,模糊与噪声是常见的退化因素,如何尽可能地实现去模糊和抑制噪声是一项重要的研究内容。提出了一种结合物镜测试的梯度约束显微成像质量提升方法:1)结合物镜MTF测试,计算获取光学PSF;2)引入L0范数梯度约束作为正则化项,设计基于该约束的复原方法;3)根据显微成像的特性,不同视场的PSF随着空间变化,提出了分块复原的方法以及解决振铃的加权渐变拼接法。结果表明,该方法复原效果好、运行效率高,可适用于数码显微系统的后处理软件集成。在方法设计中,着重进行了算法的优化以提升运行速度:1)分视场估计PSF,并通过近似等手段将复原转变为交替优化;2)充分利用单像素算法与傅里叶频域算法快速实现求解。后续研究中,主要考察测试方法的普适性、拓展参数的自适应性等,强化该方法在不同应用场景下的适用性;另外,在分视场拼接中考虑图像修复技术,以实现更好地拼接过渡,并研究其快速实现方法。

参 考 文 献

- [1] Zou Mouyan. Deconvolution and signal recovery[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2001.
邹谋炎. 反卷积和信号复原[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.
- [2] Nurmohammed P, Chrysanthe P. Image restoration for three-dimensional fluorescence microscopy using an orthonormal basis for efficient representation of depth-variant point-spread functions[J]. Biomedical Optics Express, 2015, 6(10): 3826-3841.
- [3] Besseling T H, Jose J, Blaaderen A V. Methods to calibrate and scale axial distances in confocal microscopy as a function of refractive index[J]. Journal of Microscopy, 2014, 257(2): 142-150.
- [4] Richardson W H. Bayesian-based iterative method of image restoration[J]. J Opt Soc Am, 1972, 62(1): 55-59.
- [5] Lucy L B. An iterative technique for the rectification of observed distributions[J]. The Astronomical Journal, 1974, 79: 745.
- [6] Chambolle A, Lions P. Image recovery via total variation minimization and related problems [J]. Numerische Mathematik, 1997, 76(2): 167-188.
- [7] Tao Xiaoping, Feng Huajun, Zhao Jufeng, et al. A total-variation majorization—minimization sectioned restoration algorithm with gradient ringing metric image quality assessment[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(11): 3025-3030.
陶小平, 冯华君, 赵巨峰, 等. 结合基于梯度的振铃评价算法的总变分最小化图像分块复原法 [J]. 光学学报, 2009, 29(11): 3025-3030.
- [8] Cheng Yusi. Research on microscopic image blind restoration algorithm [D]. Chongqing: Chongqing University of

- Technology, 2012.
- 成于思. 显微图像盲复原算法研究[D]. 重庆:重庆理工大学, 2012.
- [9] Levin A, Fergus R, Durand F, *et al.* Image and depth from a conventional camera with a coded aperture[C]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2007, 26(3): 70.
- [10] Chen Qihang, He Bin, Wang Junqi. Optimal extraction for edge spread function in knife-edge method[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(11):111003.
陈起行, 何斌, 王俊琦. 刃边法边缘扩散函数最优提取方法[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(11): 111003.
- [11] Yuan Li, Zhang Xiaohui, Liu Zhenjiang, *et al.* Developing of portable modulation transfer function tester[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(11): 1111001.
袁理, 张晓辉, 刘振江, 等. 便携式调制传递函数测试仪的研制[J]. 光学学报, 2015, 35(11): 1111001.
- [12] Raskar R, Agrawal A, Tumblin J. Coded exposure photography: motion deblurring using fluttered shutter[C]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2006, 25(3): 795-804.
- [13] Nayar S K, Ben-Ezra M. Motion-based motion deblurring[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2004, 26(6): 689-698.
- [14] Joshi N, Kang S B, Zitnick C L, *et al.* Image deblurring using inertial measurement sensors[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2010, 29(4): 1-9.
- [15] Cai J F, Ji H, Liu C, *et al.* Blind motion deblurring using multiple images[J]. Journal of Computational Physics. 2009, 228(14): 5057-5071.
- [16] Yuan L, Sun J, Quan L, *et al.* Image deblurring with blurred/noisy image pairs[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2007, 26(3): 1.
- [17] Chen Hua, Cai Yi, Yang Fengjuan, *et al.* 3D-PSF selection method for microscopic imaging system based on energy distribution[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(2): 0211001.
陈华, 蔡熠, 杨凤娟, 等. 基于能量分布的显微成像系统 3D-PSF 选取方法[J]. 光学学报, 2016, 36(2): 0211001.
- [18] Fergus R, Singh B, Hertzmann A, *et al.* Removing camera shake from a single photograph[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2006, 25(3): 787-794.
- [19] Shan Q, Jia J, Agarwala A. High-quality motion deblurring from a single image[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2008, 27(3): 73.
- [20] Zhao Jufeng, Mao Lei, Liu Cheng, *et al.* Microscopy imaging definition criterion using visual attention mechanism and edge spreading evaluation[J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(7): 0711002.
赵巨峰, 毛磊, 刘承, 等. 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[J]. 光子学报, 2015, 44(7): 0711002.