

## 基于傅里叶叠层显微成像的 LED 阵列位置校正方法

毛海锋, 赵巨峰\*, 崔光茫, 吴小辉

杭州电子科技大学电子信息学院, 浙江 杭州 310018

**摘要** 傅里叶叠层显微成像(FPM)利用 LED 阵列角度变化的光照来克服低数值孔径物镜的分辨率限制。在传统的 FPM 系统中,LED 阵列的位置误差将会给图像重建过程带来严重影响。因此准确校正 LED 阵列的位置对于提高重建图像质量至关重要。为了解决这一问题,提出一种基于遗传退火优化算法的位置校正方法。首先分析 LED 阵列、样品及物镜数值孔径的相对位置给入射波矢量带来的影响;接着采用遗传退火优化算法对 LED 阵列的误差位置估计全局误差参数;最后在重建过程中利用全局误差参数快速、准确地对 LED 阵列位置进行校正。仿真结果和实验结果表明,所提方法能显著提高重建图像的质量。

**关键词** 成像系统; 傅里叶叠层显微成像; 位置校正; 遗传退火算法; 图像质量

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0411002

## LED Array Position Correction Method Based on Fourier Ptychographic Microscopy

Mao Haifeng, Zhao Jufeng\*, Cui Guangmang, Wu Xiaohui

*School of Electronics and Information, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China*

**Abstract** Fourier ptychographic microscopy (FPM) uses illumination of LED array with angle change to overcome the resolution limitations of low numerical aperture objectives. In an original FPM system, position errors of an LED array severely impact an image reconstruction process. Therefore, accurately correcting the position of an LED array is very important to improve the quality of reconstructed images. To solve this problem, the study proposes a position correction method based on a genetic annealing optimization algorithm. First, the influence of the following three factors' relative positions on an incident wave vector is analyzed: the LED array, sample, and numerical aperture of objective lens. Next, the genetic annealing optimization algorithm is utilized in estimating global error parameters for LED array error locations. Finally, global error parameters are used to quickly and accurately correct the position of the LED array during the reconstruction process. Both simulation and experimental results indicate that the proposed method can significantly improve the quality of FPM reconstructed images.

**Key words** imaging systems; Fourier ptychography microscopy; position correction; genetic annealing algorithm; image quality

**OCIS codes** 110.1758; 110.0180; 100.3010

## 1 引言

傅里叶叠层显微成像(FPM)是近年来发展的一种大视场高分辨定量相位计算显微成像技术<sup>[1-3]</sup>,

该技术结合了相位恢复<sup>[4-6]</sup>和合成孔径<sup>[7-8]</sup>的概念。在一个传统的 FPM 系统中,传统显微镜中的照明系统被替换成一个可编程控制的 LED 阵列,依次点亮 LED,使之产生不同角度的入射波矢量,从而样

收稿日期: 2020-08-03; 修回日期: 2020-09-05; 录用日期: 2020-09-24

基金项目: 浙江省自然科学基金(LY18F050007)、国家自然科学基金(61805063)、浙江省基础公益项目(LGF20F050003)、浙江省科协“育才工程”项目(SKX201901)

\* E-mail: dabaozjf@hdu.edu.cn

品频谱产生不同程度的偏移,这些信息被记录在相机中,从而得到一系列低分辨率图像。对这些低分辨率图进行频域和空域的迭代更新,最终同时构建出样品的高分辨率强度图和相位图,实现了使用一个低数值孔径、低放大倍数的物镜同时获得大视场和高分辨率的成像结果。FPM 由于具有结构灵活、性能良好、采集数据冗余度丰富等优点,在血液学<sup>[9]</sup>、病理学<sup>[10]</sup>、定量相位成像<sup>[11-13]</sup>等领域得到了广泛的应用。近年来,许多学者已经进行了许多研究以改善 FPM 技术,包括快速采集算法<sup>[14-16]</sup>和系统像差校正<sup>[17-18]</sup>。这些技术的改进提高了 FPM 在生物医学观察和临床诊断中的潜力。

在传统的空域叠层成像技术中,许多学者已经开发了不同的校正技术来校正定位误差,包括共轭梯度算法<sup>[19]</sup>、遗传算法(GA)<sup>[20]</sup>、退火技术<sup>[21]</sup>及全局漂移模型<sup>[22]</sup>等。与传统的空域叠层成像技术相似,FPM 系统中也存在着类似的位置误差问题。在传统 FPM 系统中,LED 阵列位置出现误差后将会给图像重建过程带来严重影响。对于视场中的某些特定部分,其中一个 LED 元件的入射角意外地发生偏移,则相机采集的明场图像也许将变为暗场图像。如果不进行位置校正,这种情况下捕获的低分辨率图像在重建过程中将会造成约束条件不匹配,从而大大降低 FPM 重建后的图像质量。为了解决上述问题,Yeh 等<sup>[23]</sup>提出了一种全局牛顿法算法,该算法能适应具有严重噪声的环境和失调模型。Sun 等<sup>[24]</sup>提出了一种基于模拟退火(SA)算法的位置校正方法,该方法可以有效地计算 LED 阵列的旋转、水平位移和高度参数,但是该方法的性能受到退火算法的限制,容易使结果陷入局部最优解。Pan

等<sup>[25]</sup>在基于位置校正的 FPM(PC-FPM)方法的基础上增加了 LED 强度波动和像差校正内容(基于退火算法校正的 FPM 方法,SC-FPM),虽然对 FPM 照明系统的其他误差进行了校正,但是校正算法核心还是依赖退火算法。Eckert 等<sup>[26]</sup>提出了一种联合的角度自校正方法,通过结合使用预处理和迭代联合估计,FPM 算法对系统变化和样品引起的像差更加稳健。Zhang 等<sup>[27]</sup>提出了一种预处理的 LED 阵列对准方法,该方法通过精确定位样品平面上的明场区域,快速准确地估计出全局失准参数,但是重建质量易受样本大小影响。

本文提出了一种基于遗传退火优化的位置校正方法(GA-SAFPM),该方法既能有效解决单一使用退火算法使结果陷入局部最优的问题,提高算法的误差校正能力,又能有效提高算法的运行效率。首先分析 LED 阵列、样品及物镜之间的相对位置对入射波矢量的影响,接着采用遗传退火优化算法对 LED 阵列的误差位置进行全局误差参数估计,最后在图像重建过程利用全局误差参数快速、准确地对 LED 阵列位置进行校正,从而提高重建后的图像质量。仿真和实验结果表明,所提方法不仅能提高运行效率而且能显著提高重建图像的质量。

## 2 基本原理

### 2.1 FPM 基本原理

FPM 过程主要包括前向成像过程和重建过程。在前向成像过程中,样品被来自 LED 阵列的入射波照射,然后相机捕获从物镜射出的波矢量,从而可以获得一系列低分辨率图像。图 1 为典型的 FPM 系统装置图。

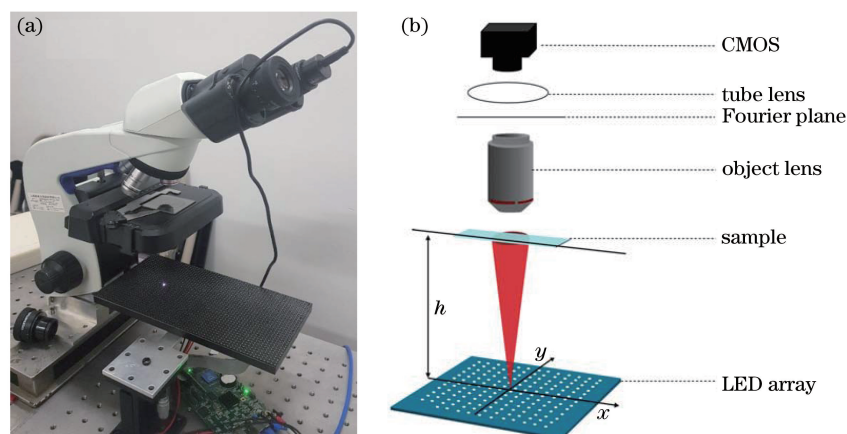


图 1 FPM 系统装置图及对应示意图。(a)装置图;(b)示意图

Fig. 1 Setup of FPM system and corresponding schematic diagram. (a) Setup; (b) schematic diagram

如图 1(b)所示,当第  $m$  行、第  $n$  列 LED 灯发出的入射波通过样品,并经系统的光瞳函数进行低通滤波后,在物镜后焦面处的频谱分布可表示为

$$\phi_{m,n}(u,v) = O(u - u_{m,n}, v - v_{m,n}) \times P(u,v). \quad (1)$$

则对应位置下相机捕获的低分辨率图像  $I_{m,n}(x',y')$  可表示为

$$I_{m,n}(x',y') = |\mathcal{F}^{-1}\{O(u - u_{m,n}, v - v_{m,n}) \times P(u,v)\}|^2. \quad (2)$$

式中:  $\mathcal{F}^{-1}\{\cdot\}$  为傅里叶逆变换;  $O(\cdot)$  为样品的频

谱;  $P(\cdot)$  为频谱的光瞳函数,作为成像系统的低通滤波器;  $(u,v)$ 、 $(x,y)$ 、 $(x',y')$  分别为物面、频谱面、像面坐标;  $(u_{m,n}, v_{m,n})$  为第  $m$  行、第  $n$  列 LED 灯入射波的空间频率。

FPM 的重建过程为,从捕获到的一系列低分辨率图像中恢复出样品的高分辨率复振幅分布,并进行迭代,使样品复振幅计算生成的低分辨率图像与拍摄到的低分辨率图像之间像素值之差最小。FPM 重建算法的具体流程如图 2 所示。

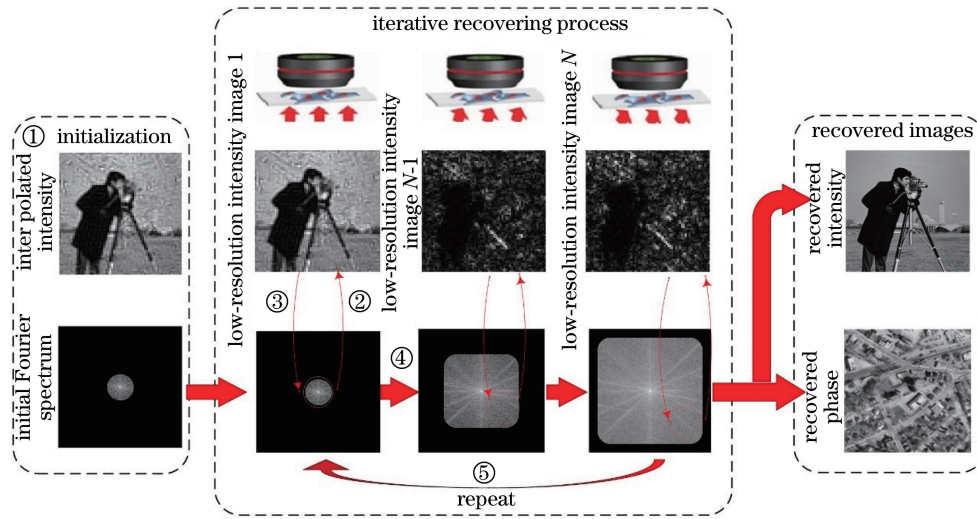


图 2 FPM 重建算法的流程

Fig. 2 Flowchart of FPM reconstruction algorithm

①在频域里生成一个样品的高分辨率初始解  $o(x,y)$ ,其频谱初始化为  $O(u,v) = \mathcal{F}\{o(x,y)\}$ 。②利用系统光瞳函数  $P(u,v)$ ,截取样品的初始高分辨率频谱中的信息,并生成目标复振幅图像  $\phi_{m,n}(x',y') = \mathcal{F}^{-1}\{O(u - u_{m,n}, v - v_{m,n}) \times P(u,v)\}$ 。③最关键的一步,保持生成的目标复振幅图像  $\phi_{m,n}(x',y')$  的相位不变,用相应照明角度下相机拍摄到的低分辨率图像  $I_{m,n}(x',y')$  去更新目标复振幅图像的振幅部分,  $\phi_{m,n}^{\text{update}}(x',y') = \sqrt{I_{m,n}(x',y')} \times \phi_{m,n}(x',y') / |\phi_{m,n}(x',y')|$ 。④利用傅里叶变换求出更新后低分辨率图像的  $\phi_{m,n}^{\text{update}}(x',y')$ ,并通过更新前后低分辨率图像的频谱差异分布  $\Delta\phi_{m,n}(u,v)$  去更新物体高分辨率频谱中相应子孔径内的频谱  $O^{\text{update}}(u - u_{m,n}, v - v_{m,n})$  和光瞳函数  $P^{\text{update}}(u - u_{m,n}, v - v_{m,n})$ 。⑤最后不断迭代更新,重复步骤②~④,直到全部的低分辨率图像都更新完。上述过程记为完成一次完整

迭代,重复步骤②~⑤,直到解收敛。

## 2.2 误差分析

在 FPM 系统中,入射波矢量  $(u_{m,n}, v_{m,n})$  由 LED 元件的位置决定,因此 LED 位置的准确度直接影响 FPM 重建结果的质量。在理想的 FPM 装置中,系统参数通常是准确的,但是在实际情况下,系统误差以各种形式存在。未经精密校正的 LED 阵列与样本的关系如图 3(a)所示,LED 阵列的误差可以由 LED 阵列的旋转系数  $\theta$ 、中心 LED 沿  $x$  轴和  $y$  轴位移系数  $\Delta x$  和  $\Delta y$ 、高度误差系数  $\Delta h$  进行定义。因此实际带有误差的 LED 光源在  $x$  轴和  $y$  轴上的位置可以表示为

$$x'_{m,n} = d_{\text{LED}}(m \cos \theta + n \sin \theta) + \Delta x, \quad (3)$$

$$y'_{m,n} = d_{\text{LED}}(-m \sin \theta + n \cos \theta) + \Delta y, \quad (4)$$

式中:  $d_{\text{LED}}$  为相邻 LED 灯的间隔距离。

则入射波矢量  $(u_{m,n}, v_{m,n})$  将被更新为

$$u_{m,n} = -\frac{2\pi}{\lambda} \frac{x_0 - x'_{m,n}}{\sqrt{(x_0 - x'_{m,n})^2 + (y_0 - y'_{m,n})^2 + (h + \Delta h)^2}}, \quad (5)$$

$$v_{m,n} = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{y_0 - y'_{m,n}}{\sqrt{(x_0 - x'_{m,n})^2 + (y_0 - y'_{m,n})^2 + (h + \Delta h)^2}}, \quad (6)$$

式中:  $(x_0, y_0)$  为中心 LED 坐标;  $(x_{m,n}, y_{m,n})$  为第  $m$  行、第  $n$  列的 LED 灯坐标;  $\lambda$  为入射波的波长;  $h$  为 LED 阵列与样品之间的距离。

由于入射波矢量有变化, 在相同位置下相机捕获到错误的低分辨率图像  $I_{m,n}(x', y')$ 。如图 3(b) 所示, 理想情况下明场成像范围边缘某个 LED 照明, 同时相机捕获的低分辨率图如图 3(d) 所示。而如图 3

(c) 所示, LED 阵列位置一旦发生了误差, 则相同位置下相机捕获的低分辨率图就如图 3(e) 所示, 一张明场图像几乎变成一张暗场图像。这将会导致捕获到的低分辨率图的强度信息与重建算法中目标低分辨率图像信息不能完全对称。当存在不可忽略的 LED 阵列位置误差时, 重建的高分辨率强度图和相位图质量将受到严重影响。

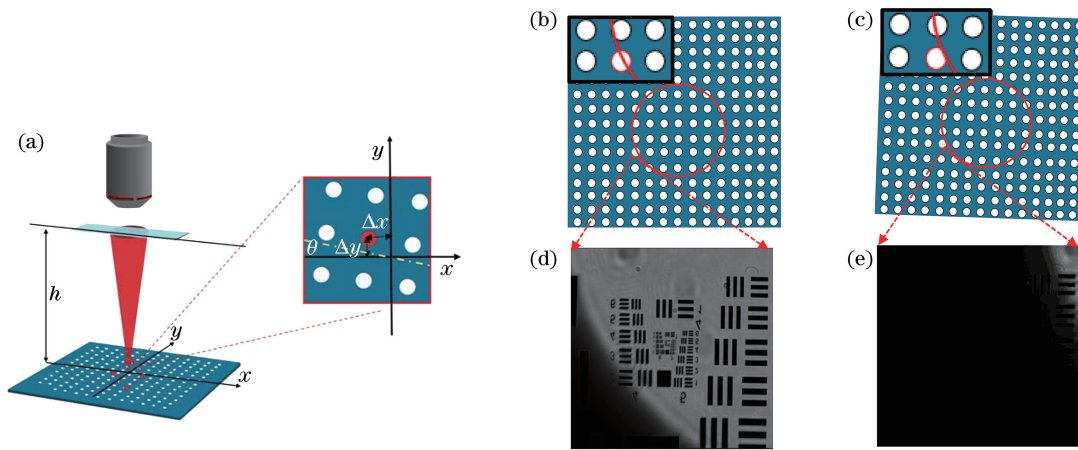


图 3 LED 阵列位置误差示意图及不同情况下捕获的低分辨率图。(a) LED 阵列位置误差示意图; (b) 理想情况下明场成像范围; (c) 错误情况下明场成像范围; (d) 理想情况下捕获的低分辨率图; (e) 错误情况下捕获的低分辨率图

Fig. 3 Schematic of LED array position error and low-resolution images captured under different conditions. (a) Schematic of LED array position error; (b) bright field imaging range under ideal condition; (c) bright field imaging range under error condition; (d) low-resolution image captured under ideal condition; (e) low-resolution image captured under error condition

### 2.3 校正算法

LED 阵列位置校正问题, 可以看成是一个对每个 LED 位置的系统误差参数  $(\Delta x, \Delta y, \theta, \Delta h)$  取得最优解的问题。传统退火算法存在结果容易陷入局部最优的问题, 并且当误差参数较大时, 搜索最优解的时间将会变长。将遗传算法与退火算法相结合, 能够优化过程中的搜索行为, 增强全局和局部的搜索能力和提高效率, 可以快速且有效地取得 LED 阵列位置的最优解, 从而快速、准确地对 LED 阵列位置进行校正, 具体算法流程如图 4 所示。

算法具体流程如下。

#### 1) 种群和算法参数初始化

设定搜索算法的初始化参数: 初始种群大小  $M$ 、交叉概率  $P_c$ 、变异概率  $P_m$ 、退火初始温度  $T_0$ 、稳定温度  $T_{\text{final}}$ 、退火比率  $R$  等。对待优化的系统误

差参数  $(\Delta x, \Delta y, \theta, \Delta h)$  进行编码, 并产生初始种群。

#### 2) 利用遗传算法进行全局位置搜索

设置  $k$  为全局搜索迭代次数, 初始迭代时, 选取一个 LED 位置作为初始输入, 之后每增加一次全局搜索迭代, 将更新后的 LED 位置作为输入。对于输入的 LED 位置, 计算其对应的适应度函数  $E_k$ , 适应度函数  $E_k$  反映目标复振幅强度  $|\varphi_{m,n}(x', y')|^2$  与实际捕获的低分辨率图像强度  $I_{m,n}(x', y')$  的差值。其中目标低分辨率图像  $\varphi_{m,n}(x', y')$  更新为  $\varphi_{m,n, \Delta u_{m,n}, \Delta v_{m,n}}(x, y)$ , 表达式为

$$\varphi_{m,n, \Delta u_{m,n}, \Delta v_{m,n}}(x, y) = \mathcal{F}^{-1} \{O[u - (u_{m,n} + \Delta u_{m,n}), v - (v_{m,n} + \Delta v_{m,n})] \times P(u, v)\}. \quad (7)$$

$(\Delta u_{m,n}, \Delta v_{m,n})$  由  $(\Delta x, \Delta y, \theta, \Delta h)$  决定。随着搜索次数的增加,  $(\Delta x, \Delta y, \theta, \Delta h)$  不断搜索, 直到接近实际位置处的参数, 换言之, 对应的目标复振幅

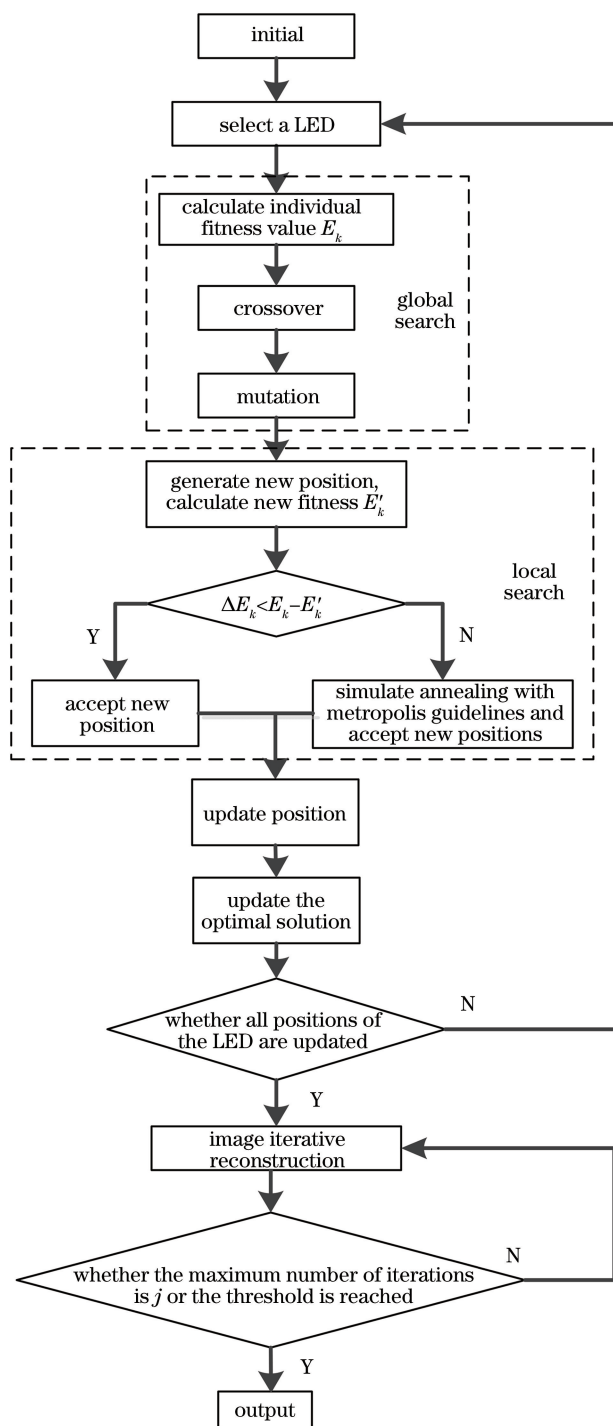


图 4 基于遗传退火算法的 LED 阵列校正方法

Fig. 4 LED array correction method based on genetic annealing algorithm

强度  $|\varphi_{m,n,\Delta u_{m,n},\Delta v_{m,n}}(x',y')|^2$  也就越接近相机实际拍摄到的低分辨率图像强度  $I_{m,n}(x',y')$ ,  $E_k$  值也就越接近 0。

$$E_k = |\varphi_{m,n,\Delta u_{m,n},\Delta v_{m,n}}(x',y')|^2 - I_{m,n}(x',y'). \quad (8)$$

根据步骤 1) 中设定的遗传算法参数, 通过交叉和变异运算得到新的个体。交叉运算是将好的个体

随机配对, 并按照一定概率  $P_c$  相互交换部分基因, 从而形成新的个体; 变异运算是按照一定的概率  $P_m$  对个体进行改变, 从而形成新的个体。

3) 利用模拟退火算法开展局部搜索

在步骤 2) 交叉和变异后得到的种群结果中进行一次随机扰动, 产生一个扰动新解并计算其新的适应度函数  $E'_k$ , 计算  $E_k$  和  $E'_k$  的差异, 得到

$$\Delta E_k = E_k - E'_k. \quad (9)$$

若  $\Delta E_k < 0$ , 则接受该次扰动新解, 作为此次局部搜索的最优解, 并在下一次全局搜索时更新。若  $\Delta E_k \geq 0$ , 则根据 Metropolis 准则进行处理:

$$P \leq \exp(-\Delta E_k / T_{kj}). \quad (10)$$

式中:  $T_{kj}$  为第  $k$  次全局搜索中第  $j$  次局部搜索的模拟退火算法的温度。

若(10)式成立, 则接受该次扰动新解, 将其作为此次局部搜索的最优解, 结束局部搜索, 更新位置和局部最优解, 开始下一次全局搜索。若(10)式不成立, 则放弃该次扰动新解, 根据退火比率  $R$ , 计算下一次模拟退火温度  $T_{k(j+1)} = T_{kj} \times R$ , 并重复步骤 3), 进行下一次局部搜索。当模拟退火温度  $T_{kj}$  达到初始设定的稳定温度  $T_{\text{final}}$  时, 接受该次局部搜索的最优解, 更新位置和局部最优解, 开始下一次全局搜索。

4) 判断 LED 阵列的所有位置是否更新完毕, 如果全部更新完毕, 则进行步骤 5), 如果不满足, 则返回步骤 2)。

5) 等到 LED 阵列所有位置校正完成后, 利用迭代投影法进行重建, 当收敛误差  $E_{\text{iter}}$  小于预设值时, 迭代结束, 输出重建强度图和相位图。

$$E_{\text{iter}} = \frac{\sum_{m,n} [|\varphi_{m,n}(x', y')|^2 - I_{m,n}(x', y')]}{\sum_{m,n} I_{m,n}(x', y')}. \quad (11)$$

### 3 仿真与分析

在将 GA-SAFPM 应用于实际实验数据之前, 首先通过仿真来评估其有效性。仿真实验中, 设计的 LED 阵列尺寸大小为  $15 \times 15$ , LED 阵列平面与样品平面之间的距离  $h = 90$  mm, 相邻 LED 之间的距离为  $d_{\text{LED}} = 4$  mm, 工作波长  $\lambda = 630$  nm, 显微物镜放大倍数为  $4 \times$ , 等效数值孔径(NA)为 0.1, 相机传感器像元尺寸为 6.3 mm。

搜索算法参数初始化设置为: 种群大小  $M$  设为 50, 交叉概率  $P_c$  设为 0.85, 变异概率  $P_m$  设为 0.01, 模拟退火算法初始温度  $T_0$  设为 100, 稳定温度  $T_{\text{final}}$  设为 25, 退火比率  $R$  设为 0.95, 迭代次数阈值为 30。

为了展示 GA-SAFPM 的有效性, 在仿真中故意放大 LED 阵列误差, 其中将引起位置误差的因子  $(\Delta x, \Delta y, \theta, \Delta h)$  设置为  $(\Delta x = 1$  mm,  $\Delta y = 1$  mm,

$$\theta = 10^\circ, \Delta h = 1.5$$
 mm)。

不同校正方法的仿真结果如图 5 所示, 图 5(a)、(b)是原始输入的高分辨强度图和相位图。基于原始输入图像, 构造出 225 幅低分辨率图, 相当于实际拍摄中相机捕获的低分辨率图。图 5(a1)、(b1)、(c1)是传统 FPM 重建方法重建的高分辨强度图、相位图、频谱图, 可以明显看到, 图 5(a1)、(b1)中有十分明显的伪影和皱褶, 极其严重地破坏了重建图像的质量。图 5(a2)、(b2)、(c2)是 PC-FPM 校正方法重建的高分辨强度图、相位图、频谱图, 可以看到, 重建图像的质量虽然得到了提高, 但是图像质量仍然较差, 重建后的 Lenna 图中脸部仍有许多细微的皱褶。这是因为在阵列误差较大的情况下, PC-FPM 校正容易收敛到局部最优解, 使得 LED 阵列误差校正效果不佳, 导致重建图像质量不够理想, 虽然可以通过增加退火算法中的搜索次数来提高校正效果, 但是这会使图像重建算法变得极为耗时。图 5(a3)、(b3)、(c3)是所提 GA-SAFPM 重建的高分辨强度图、相位图、频谱图, GA-SAFPM 不仅可以有效提高重建图像的质量, 并且可以快速进入迭代收敛。如图 6(a)、(b)所示, 重建强度图和重建相位图的方均根误差(RMSE)随迭代次数增加而逐渐减小至趋于稳定, GA-SAFPM 大约经 10 个迭代次数就能进入收敛状态, 且 RMSE 值要小于 PC-FPM。图 6(c)模拟不同情况下入射波在傅里叶域中对应的位置, 其中理想情况下的孔径位置用星星符号标记, 带有误差的孔径位置用圆点符号标记, 校正后的孔径位置用菱形符号标记。从图 6(c)中可以明显看出, 经 GA-SAFPM 校正后, 孔径位置很大部分都得到了校正。

另外, 为了证明 GA-SAFPM 的鲁棒性要胜于传统 FPM 和 PC-FPM, 引入图像质量评价指标峰值信噪比(PSNR)和结构相似性(SSIM)来对图像重建结果进行客观评价, 并对算法运行时间进行记录。PSNR 衡量像素差异平方和的平均, 表达式为

$$\begin{cases} R_{\text{MSE}} = \frac{1}{N_{\text{num}} N_{\text{num}}} \sum (x - y)^2 \\ R_{\text{PSN}} = 10 \lg \left( \frac{255}{R_{\text{MSE}}} \right)^2 \end{cases}, \quad (12)$$

式中:  $x$  为待评价图像;  $y$  为参考图像;  $N_{\text{num}}$  为像素总数。SSIM<sup>[28]</sup>是亮度、对比度及结构相似度的结合, 可表示为

$$S_{\text{SIM}} = [l(x, y)][c(x, y)][s(x, y)], \quad (13)$$

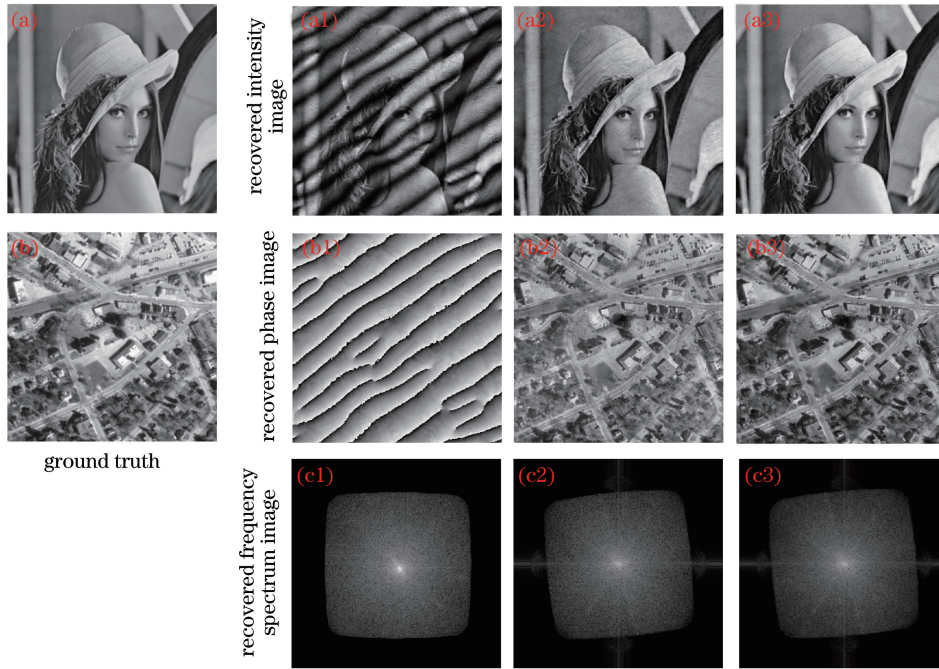


图 5 不同校正方法的重建结果。(a)原始的高分辨率强度图;(b)原始的高分辨率相位图;  
(a1)~(c1)传统 FPM 方法;(a2)~(c2) PC-FPM 方法;(a3)~(c3) GA-SAFPM 方法

Fig. 5 Reconstruction results of different correction methods. (a) Original high-resolution intensity image; (b) original high-resolution phase image; (a1)–(c1) original FPM method; (a2)–(c2) PC-FPM method; (a3)–(c3) GA-SAFPM method

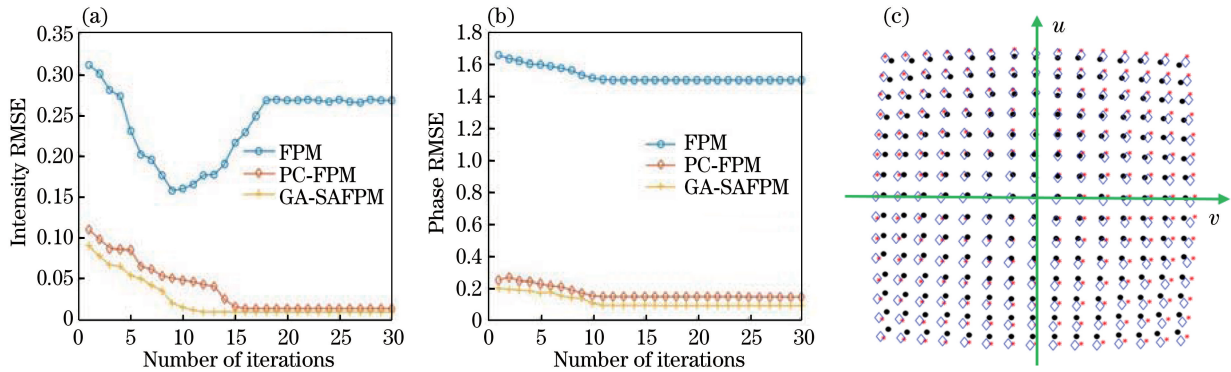


图 6 重建图像的 RMSE 与迭代次数的关系及校正前后入射波位置的示意图。(a)重建强度与迭代次数的关系;  
(b)重建相位与迭代次数的关系;(c)校正前后入射波在傅里叶域中对应的孔径位置

Fig. 6 Relationship between RMSE of reconstruction images and number of iterations, and schematic of incident wave position before and after correction. (a) Relationship between reconstructed intensity and number of iterations; (b) relationship between reconstructed phase and number of iterations; (c) corresponding aperture position of the incident wave in the Fourier domain before and after correction

$$\begin{cases} l(x, y) = \frac{2\mu_x\mu_y + C_1}{\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1} \\ c(x, y) = \frac{2\sigma_x\sigma_y + C_2}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2} \\ s(x, y) = \frac{\sigma_{xy} + C_3}{\sigma_x\sigma_y + C_3} \end{cases}, \quad (14)$$

式中:  $\mu_x, \sigma_x$  及  $\mu_y, \sigma_y$  分别为  $x$  与  $y$  的均值与标准差,  $\sigma_{xy}$  为两者的协方差;  $C_1, C_2, C_3$  是用来避免病态

的常数,  $C_1 = C_2 = C_3 = 0.01$  (数据的取值结合了文献 [28] 的推荐与实验测试)。不同程度误差影响下的重建结果的客观评价如表 1 所示。当 LED 阵列位置误差较小时, GA-SAFPM 和 PC-FPM 的校正能力相差不大; 但是当 LED 阵列位置误差较大时, 基于退火算法的 PC-FPM 的校正能力就不足, 这是因为退火算法在阵列位置误差较大时会容易收敛到局部最优解, 导致校正能力下降, 使得重建后图像质量变差。总体来

看,GA-SAFPM 校正方法的性能要优于 PC-FPM,并且算法运行时间要少于 PC-FPM 方法。GA-SAFPM

方法对于提高重建图像质量具有明显的作用,能提高对 LED 阵列误差校正的效率。

表 1 不同程度误差影响下,重建强度图和相位图的客观评价结果

Table 1 Objective evaluation results of reconstructed intensity and reconstructed phase images under the different errors

Parameter	Method	Time /s	Intensity/Phase	PSNR /dB	SSIM
$(\Delta x=0.5 \text{ mm}, \Delta y=0.5 \text{ mm}, \theta=5^\circ, \Delta h=1 \text{ mm})$	Original FPM	19.3236	Intensity	16.5052	0.6166
			Phase	6.4319	0.1854
	PC-FPM	57.0173	Intensity	36.3721	0.9590
			Phase	22.8571	0.9245
	GA-SAFPM	42.3671	Intensity	37.2878	0.9760
			Phase	23.9286	0.9460
$(\Delta x=1 \text{ mm}, \Delta y=1 \text{ mm}, \theta=10^\circ, \Delta h=1.5 \text{ mm})$	Original FPM	19.9401	Intensity	15.0841	0.4734
			Phase	5.8714	0.1038
	PC-FPM	63.9373	Intensity	29.3132	0.8972
			Phase	20.8917	0.8927
	GA-SAFPM	47.0587	Intensity	34.2947	0.9487
			Phase	24.1032	0.9209
$(\Delta x=1.5 \text{ mm}, \Delta y=1.5 \text{ mm}, \theta=15^\circ, \Delta h=2 \text{ mm})$	Original FPM	19.7237	Intensity	11.0371	0.2831
			Phase	4.8678	0.0401
	PC-FPM	86.8979	Intensity	28.9175	0.8311
			Phase	17.4954	0.8235
	GA-SAFPM	51.3260	Intensity	31.0571	0.9196
			Phase	20.5173	0.8975

## 4 实验与分析

如图 1(a)所示,采用 OLYMPUS CX23 显微镜来设计 FPM 系统。在该次实验中,采用的 LED 阵列尺寸大小为  $15 \times 15$ ,LED 阵列平面与样品平面之间的距离  $h=87.5 \text{ mm}$ ,相邻 LED 之间的距离  $d_{\text{LED}}=4.5 \text{ mm}$ ,工作波长  $\lambda=630 \text{ nm}$ ,显微物镜放大倍数为  $4 \times$ ,等效 NA 为 0.1,图像传感器像元尺寸为  $2.2 \text{ mm}$ 。实验初始阶段不对 LED 阵列位置进行精确的机械校正。利用上述配置的 FPM 系统对 USAF 透明标靶进行拍摄,共捕获 225 张低分辨率图像。为了证明 GA-SAFPM 方法的有效性,分别比较了传统 FPM、PC-FPM、GA-SAFPM 对 USAF 透明标靶重建的结果。

图 7 为不同方法对 USAF 透明标靶的重建结果,图 7(a)是中心 LED 照射下捕获的低分辨率图,图 7(b)是其中一处的放大部分。图 7(c)是使用传统 FPM 重建的高分辨率强度图,图像质量较差,有明显的伪影和失真,且放大最小线对后,不易分清辨别。图 7(d)、(e)分别是 PC-FPM 和 GA-SAFPM 重建的高分辨率强度图,在一定程度上,相较于传统 FPM 方法,它们重建的高分辨率强度图的质量都得到了明显的提升。为了进一步对比,对采

用不同校正方法重建后的透明标靶最小线对进行客观评估,在线对图像上选取一条垂直于线对的线,获得该线轨迹的归一化强度分布曲线,如图 7(f)所示。可以明显看到,GA-SAFPM 方法恢复的线迹像素归一化强度分布明显要优于传统 FPM 和 PC-FPM,由此可以看出,GA-SAFPM 方法可以使重建的高分辨率强度图具有更多的细节和更好的清晰度。

另外,还进行了一组地钱叶样品的对比实验,实验结果对比如图 8 所示,图 8(a)是中心 LED 照射下捕获的低分辨率图像,图 8(b)是其局部放大图。图 8(c)和图 8(f)分别是使用传统 FPM 方法重建的强度图和相位图,可以明显看到一些伪影和皱褶,这是因为当样本的细节越丰富时,对 LED 阵列位置的精确度要求就越高。图 8(d)和图 8(g)分别是使用 PC-FPM 方法重建的强度图和相位图,相较于传统 FPM 方法,重建强度图的效果要好得多,但是相位图有些失真。GA-SAFPM 重建的强度图和相位图具有更清晰的细节,如图 8(e)和图 8(h)所示。这进一步证明了所提方法的可行性,所提方法无需事先对 LED 阵列进行精密的机械校正,也能通过算法对 LED 阵列位置进行准确地校正,从而提高重建图像的质量。



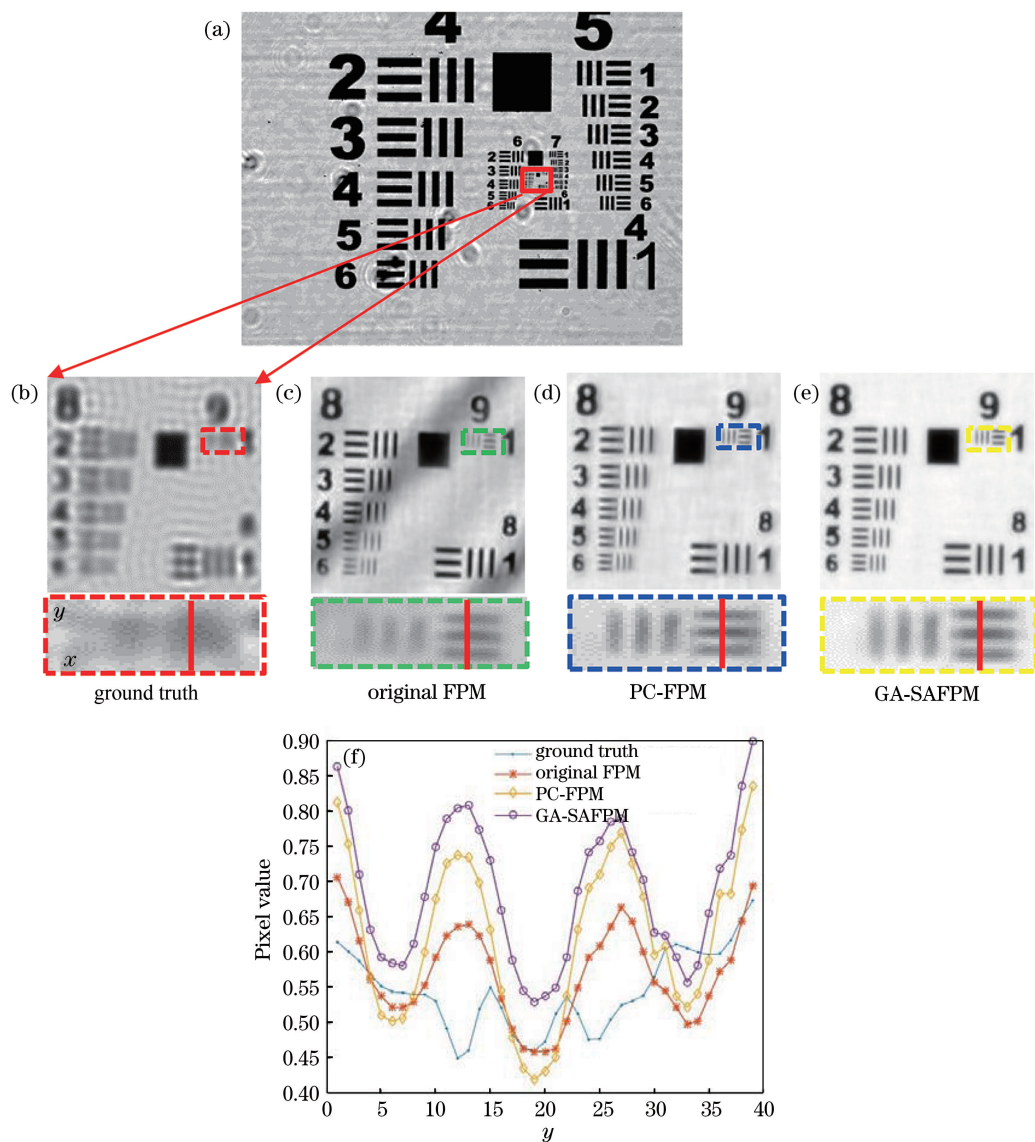


图 7 透明标靶的重建结果。(a)(b)中心 LED 照射下捕获的低分辨率图及局部放大图;(c)传统 FPM 方法重建的高分辨率强度图;(d) PC-FPM 方法重建的高分辨率强度图;(e) GA-SAFPM 重建的高分辨率强度图;(f)图 7(b)~(e)放大部分中垂直于线对的线轨迹像素归一化强度分布曲线

Fig. 7 Reconstruction results of transparent target. (a)(b) low-resolution image and a partially enlarged image captured under central LED illumination; (c) high-resolution intensity image reconstructed by the original FPM method; (d) high-resolution intensity image reconstructed by the PC-FPM method; (e) high-resolution intensity image reconstructed by GA-SAFPM; (f) normalized intensity distribution curve of line track pixels perpendicular to the line pair in the magnified part Fig. 7(b)-(e)

最后针对上述两组不同标本实验进行算法运行时间对比,算法的运行时间如表 2 所示,如果不进行校正直接进行图像重建是最快的,但是重建图像质量是最差的。PC-FPM 最耗时,这是因为在阵列误差较大的情况下,PC-FPM 校正容易收敛到局部最优解,导致对 LED 阵列误差的校正能力下降,重建

图像质量不够理想。虽然可以通过增加退火算法中的搜索次数来提高校正效果,但是这将会让图像重建算法变得极为耗时,这是 PC-FPM 方法的一个局限性。GA-SAFPM 方法的运行速度相较 PC-FPM 方法有了大幅度提高,算法运行时间大概缩短了一半,且重建后的图像质量也要优于 PC-FPM 方法。

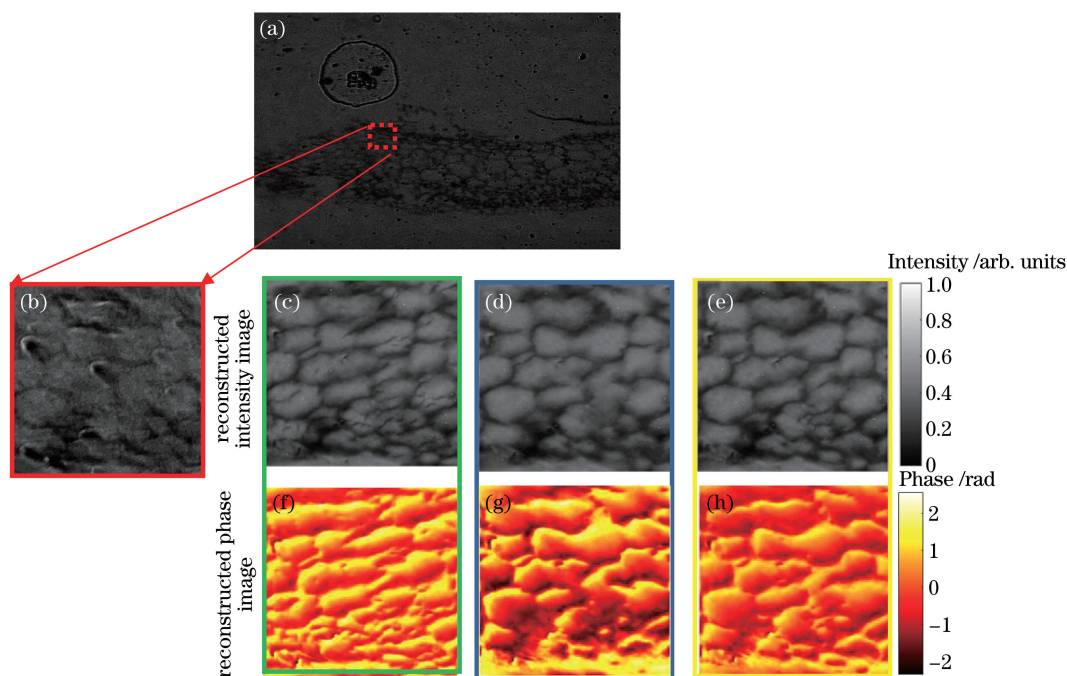


图 8 地钱叶样品的重建结果。(a)(b)捕获的低分辨图及局部放大图;(c)(f)传统 FPM 方法;(d)(g) PC-FPM 方法;(e)(h) GA-SAFPM 方法

Fig. 8 Reconstruction results of Diqianye samples. (a)(b) Captured low-resolution image and a partial enlarged image; (c)(f) original FPM method; (d)(g) PC-FPM method; (e)(h) GA-SAFPM method

表 2 不同标本实验下的不同方法运行时间对比结果  
Table 2 Comparison results of running time of different methods under different sample experiments

Experiment	Method	Time /s
USAF (experiment 1)	Original FPM	145
	PC-FPM	632
	GA-SAFPM	421
Diqianye (experiment 2)	Original FPM	185
	PC-FPM	758
	GA-SAFPM	388

## 5 结 论

提出一种基于遗传退火优化的 LED 阵列位置校正方法。首先分析 LED 阵列和样品之间的相对位置给入射波矢量带来的影响,接着采用遗传退火优化算法对 LED 阵列的误差位置估计误差参数,最后在重建过程中利用误差参数快速、准确地对 LED 阵列位置进行校正。仿真结果和实验结果表明,所提方法显著提高了重建图像的质量。不足之处在于,一方面没有考虑系统误差中存在的一些特殊情况,例如 LED 灯的照明强度波动对重建图像质量的影响,没有针对环境噪声进行一些处理,后期可以考虑结合一些传统的去噪方法对所提方法进行完善。另一方面,可以结合一些提高 FPM 重建效率的方

案,使得在提高效率的同时可以提高图像重建质量。这些方法上的改进都将是今后研究的主要方向。

## 参 考 文 献

- [1] Ou X Z, Horstmeyer R, Yang C, et al. Quantitative phase imaging via Fourier ptychographic microscopy [J]. Optics Letters, 2013, 38(22): 4845-4848.
- [2] Zheng G A, Horstmeyer R, Yang C. Wide-field, high-resolution Fourier ptychographic microscopy [J]. Nature Photonics, 2013, 7(9): 739-745.
- [3] Sun J S, Zhang Y Z, Chen Q, et al. Fourier ptychographic microscopy: theory, advances, and applications[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(10): 1011005.  
孙佳嵩, 张玉珍, 陈钱, 等. 傅里叶叠层显微成像技术: 理论、发展和应用[J]. 光学学报, 2016, 36(10): 1011005.
- [4] Gonsalves R A. Phase retrieval from modulus data [J]. Journal of the Optical Society of America, 1976, 66(9): 961-964.
- [5] Fienup J R. Phase retrieval algorithms: a comparison [J]. Applied Optics, 1982, 21(15): 2758-2769.
- [6] Elser V. Phase retrieval by iterated projections [J]. Journal of the Optical Society of America A, 2003, 20(1): 40-55.
- [7] Jang J S, Javidi B. Three-dimensional synthetic aperture integral imaging [J]. Optics Letters, 2002,

- 27(13): 1144-1146.
- [8] Stern A, Javidi B. 3-D computational synthetic aperture integral imaging (COMPSAI) [J]. *Optics Express*, 2003, 11(19): 2446-2451.
- [9] Horstmeyer R, Ou X Z, Zheng G A, et al. Digital pathology with Fourier ptychography [J]. *Computerized Medical Imaging and Graphics*, 2015, 42: 38-43.
- [10] Williams A, Chung J, Ou X Z, et al. Fourier ptychographic microscopy for filtration-based circulating tumor cell enumeration and analysis [J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2014, 19(6): 066007.
- [11] Chung J, Ou X Z, Kulkarni R P, et al. Counting white blood cells from a blood smear using Fourier ptychographic microscopy [J]. *PLoS One*, 2015, 10(7): e0133489.
- [12] Tian L, Waller L. Quantitative differential phase contrast imaging in an LED array microscope [J]. *Optics Express*, 2015, 23(9): 11394-11403.
- [13] Xie Z L, Ma H T, Ren G, et al. Research on the key parameters of aperture-scanning Fourier ptychography [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(10): 1011002.  
谢宗良, 马浩统, 任戈, 等. 小孔扫描傅里叶叠层成像的关键参量研究 [J]. *光学学报*, 2015, 35(10): 1011002.
- [14] Lin Z Q, Ma X, Lin J X, et al. Fourier ptychographic microscopy based on rotating arc-shaped array of LEDs [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(7): 071102.  
林子强, 马骁, 林锦新, 等. 基于弧形阵列 LED 光源旋转照明装置的傅里叶叠层显微术 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(7): 071102.
- [15] Li S F, Zhao Y, Chen G H, et al. Extraction of particle size via Fourier ptychography with selective illuminations [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(11): 1103005.  
李生福, 赵宇, 陈光华, 等. 选择型照明傅里叶叠层成像提取粒子尺度 [J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(11): 1103005.
- [16] Li T, Zhao J F, Mao H F, et al. An efficient Fourier ptychographic microscopy imaging method based on angle illumination optimization [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(8): 081106.  
李通, 赵巨峰, 毛海锋, 等. 基于角度照明优化的傅里叶叠层显微成像方法 [J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(8): 081106.
- [17] Bian Z C, Dong S Y, Zheng G A. Adaptive system correction for robust Fourier ptychographic imaging [J]. *Optics Express*, 2013, 21(26): 32400-32410.
- [18] Ou X Z, Zheng G A, Yang C. Embedded pupil function recovery for Fourier ptychographic microscopy [J]. *Optics Express*, 2014, 22(5): 4960-4972.
- [19] Tripathi A, McNulty I, Shpyrko O G. Ptychographic overlap constraint errors and the limits of their numerical recovery using conjugate gradient descent methods [J]. *Optics Express*, 2014, 22(2): 1452-1466.
- [20] Maiden A M, Humphry M J, Sarahan M C, et al. An annealing algorithm to correct positioning errors in ptychography [J]. *Ultramicroscopy*, 2012, 120: 64-72.
- [21] Beckers M, Senkbeil T, Gorniak T, et al. Drift correction in ptychographic diffractive imaging [J]. *Ultramicroscopy*, 2013, 126: 44-47.
- [22] Zhang F C, Peterson I, Vila-Comamala J, et al. Translation position determination in ptychographic coherent diffraction imaging [J]. *Optics Express*, 2013, 21(11): 13592-13606.
- [23] Yeh L H, Dong J, Zhong J S, et al. Experimental robustness of Fourier ptychography phase retrieval algorithms [J]. *Optics Express*, 2015, 23(26): 33214-33240.
- [24] Sun J S, Chen Q, Zhang Y Z, et al. Efficient positional misalignment correction method for Fourier ptychographic microscopy [J]. *Biomedical Optics Express*, 2016, 7(4): 1336-1350.
- [25] Pan A, Zhang Y, Zhao T, et al. System calibration method for Fourier ptychographic microscopy [J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2017, 22(9): 096005.
- [26] Eckert R, Phillips Z F, Waller L. Efficient illumination angle self-calibration in Fourier ptychography [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(19): 5434-5442.
- [27] Zhang J Z, Xu T F, Liu J D, et al. Precise brightfield localization alignment for Fourier ptychographic microscopy [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(1): 1-13.
- [28] 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.