

# 傅里叶叠层显微术的照明光强校正研究

杨佳琪<sup>1</sup>, 马 晓<sup>1</sup>, 林锦新<sup>1</sup>, 钟金钢<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>暨南大学光电工程系, 广东 广州 510632;

<sup>2</sup>暨南大学广东省光纤传感与通信技术重点实验室, 广东 广州 510632

**摘要** 傅里叶叠层显微术(FPM)是一种新型的计算显微成像技术,FPM与传统显微术照明方式不同,常采用可编程LED阵列进行不同角度照明,而LED灯珠发射光强与角度有关,随角度增大光强迅速减弱,不同角度照明光强不能保证一致,导致重建图像质量下降。因此,在进行相位迭代反演计算过程中,需要对不同角度照明拍摄的图像进行光强校正。介绍了不同角度照明光强不均一的原因,通过数值模拟,探讨了对不同角度照明光强进行校正的必要性,最后给出了物理上光强校正的实验结果。

**关键词** 成像系统; 显微术; 超分辨成像; 计算成像; 相位反演

**中图分类号** O436 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP54.031101

## Intensity Correction Research for Fourier Ptychographic Microscopy

Yang Jiaqi<sup>1</sup>, Ma Xiao<sup>1</sup>, Lin Jinxin<sup>1</sup>, Zhong Jingang<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Department of Optoelectronic Engineering, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510632, China;

<sup>2</sup>Guangdong Provincial Key Laboratory of Optical Fiber Sensing and Communications, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510632, China

**Abstract** Fourier ptychographic microscopy (FPM) is a recently developed computational microscopy. Different from the conventional microscopy, the FPM generally employs a programmable LED array as an illumination source for angular illuminations. The intensity of LED illumination is corresponding to the emitting angle. The luminous intensity decreases rapidly with the increasing of emitting angle. The illumination intensity of different angles cannot be consistent, which leads to the decline of the reconstructed image quality. Consequently, the intensity correction of low-resolution raw images is consequently needed before the iterative phase retrieval process. The reasons of the different angles of illumination intensity inhomogeneity are introduced. Numerical simulations demonstrate the necessity of the intensity correction. Finally, the experimental results of physical intensity correction are given.

**Key words** imaging systems; microscopy; super-resolution imaging; computational imaging; phase retrieval

**OCIS codes** 110.1758; 100.5070; 170.0180; 100.6640

## 1 引言

传统光学显微镜的分辨率受衍射极限限制,并且物镜的放大倍数越高,能观察的视场越小,已不能满足日益发展的科学研究需求。傅里叶叠层显微术(FPM)自2013年美国加州理工大学的Zheng等<sup>[1]</sup>提出以来,由于其能实现超分辨、宽视场显微成像而倍受关注,近年来成为显微成像领域的研究热点<sup>[2-9]</sup>。

FPM是一种计算成像技术<sup>[10-11]</sup>,将多张低分辨率图像,通过G-S(Gerchberg-Saxton)相位迭代反演算法<sup>[12-13]</sup>,计算得到一张高分辨率的图像。就其物理本质而言,FPM可以看成是一种综合孔径成像技术<sup>[14]</sup>,即在不同角度照明下,经小孔径物镜成像图,通过计算合成一张等效大孔径成像图。传统的综合孔径成像技

**收稿日期:** 2016-11-15; **收到修改稿日期:** 2016-12-02

**基金项目:** 国家自然科学基金(61475064)、广东省自然科学基金(2015A030310458)、广东省科技计划项目(2013B060100001)

**作者简介:** 杨佳琪(1992—),女,硕士研究生,主要从事光电信息技术方面的研究。E-mail: 1518849052@qq.com

**导师简介:** 钟金钢(1964—),男,博士,教授,主要从事光电信息技术方面的研究。

E-mail: tzjg@jnu.edu.cn(通信联系人)

术,需要知道不同角谱光波的相位关系,多采用相干光源照明,通过干涉的方法获取其相位,进而合成一张综合孔径图像<sup>[15]</sup>。而 FPM,通过不同角度照明下的强度图,进行强度约束迭代计算,以获取不同角谱光波的相位关系,最终合成一张综合孔径图像。FPM 无需干涉记录相位过程,通常采用 LED 非相干光代替激光作为实验光源,使实验装置更加简单。理论上在 FPM 中,不同角度的照明光可近似看作平面波,其光强应保持一致。在目前的实验过程中,LED 光源多采用平板阵列形式排布,由于 LED 灯珠在各个角度方向的发光强度不一致,导致最终的重建图像质量下降。因此,有必要在进行迭代计算重建图像过程中,对不同角度照明图像进行照明光强校正。

本文对不同角度照明图像的照明光强校正问题进行了研究,通过模拟仿真实验,探讨了不同角度照明光强校正的必要性,并给出了经过光强度校正的实验结果。

## 2 FPM 原理及照明光强校正问题

### 2.1 FPM 原理

传统的显微成像方式如图 1(a)所示,一束正入射平面光波照射到样品上,经过样品出射衍射光场,其中包含各角度的角谱信息,衍射光波被显微物镜收集成像。由于物镜的数值孔径有限,只有在 $\pm\alpha$ 角度内低频分量的角谱衍射光才可进入物镜成像,而超出了物镜入射孔径角 $\pm\alpha$ 的高频部分角谱衍射光不能被物镜收集,从而导致显微物镜成像具有衍射极限。物镜的数值孔径越大,分辨率就越高,工作距离越短。

利用综合孔径成像技术,可以在一定范围内突破衍射极限。如图 1(b)所示,如果照明光束以一定的角度照射样品,衍射光分布将发生改变。此时图 1(a)中的高频角谱衍射光就能够进入物镜,因此在一定角度的照明下,经显微物镜成像的图像包含了部分高频信息。那么采用多个不同角度的平面光波,分别对样品进行照明,可获得多张包含高频信息的图像,利用这些图像中记录的高频信息,可以合成一张超越原有衍射极限的高分辨率图像,即获得了一张相对大数值孔径的显微图像。但根据成像的角谱理论,不同角谱衍射光波干涉叠加后,形成复振幅光场,经显微物镜后被光电器件收集转换形成图像。若要恢复具有更多高频信息的光波,也要通过干涉叠加方式,必须要知道不同角谱光波的相位关系,而光电器件在获取不同角度照明图像时,丢失了相位,只保留了图像的强度信息,不能通过简单的累加办法来获得高分辨率图像。因此,获得不同角度谱光波的相位关系是综合孔径成像技术的关键之一。传统的综合孔径成像技术,多采用相干光源照明,通过干涉的方法获取其相位,装置复杂,且相干光源易出现相干噪声。Gerchberg 和 Saxton 提出的 G-S 相位反演算法,不需要进行干涉,而是通过迭代计算得到光波的相位,已应用在许多领域解决相位反演问题,在不同的应用领域中,相位反演过程稍有差异。FPM 就是利用 G-S 相位反演算法,通过不同角度照明的强度图像约束迭代计算,获得不同角度谱光波的相位关系,无需相干光源,装置简单。

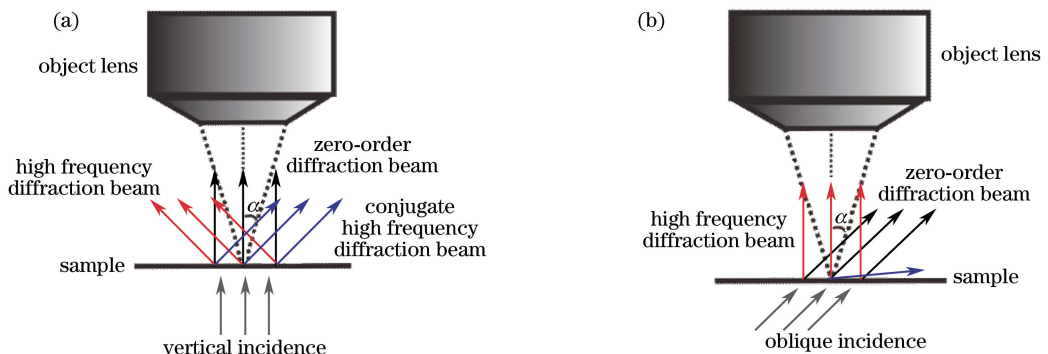


图 1 照明示意图。(a)正入射;(b)斜入射

Fig. 1 Diagram of illumination. (a) Vertical incidence; (b) oblique incidence

FPM 是一种间接成像技术,实现成像需拍摄和重建两过程。图 2 为实验装置示意图,从上到下依次为 CCD 相机(或 CMOS 相机)、低倍显微物镜、样品和阵列 LED 灯板。灯板面垂直成像系统的光轴线,灯珠一般按等间距排列,间距要保证相邻灯珠各自照明样品时,显微图像频谱有一定的重叠。由于显微物镜可观察样品的视场很小,可以把灯珠照明样品的球面波近似看作平面波,传播方向由灯珠的位置决定,第  $i$  个灯珠的波矢量为

$k_i$ , 在  $x, y$  方向上的波矢分量为  $k_{ix}, k_{iy}$ 。照明平面沿波矢方向传播一定距离到达样品, 经样品后产生衍射光波, 被显微物镜收集成像。拍摄过程中, 依次点亮矩阵 LED 灯板中的每一个灯珠, 照明样品形成不同角度的照明光波, 同时用相机依次拍摄每个灯珠照明样品的图像, 从而获得一系列低分辨率的显微图像。

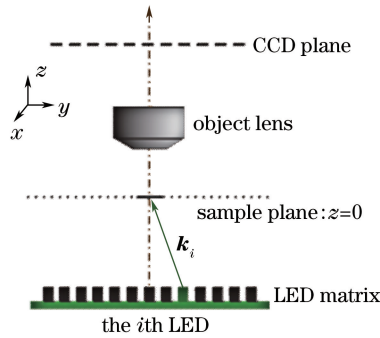


图 2 FPM 装置示意图

Fig. 2 Diagram of FPM setup

利用拍摄到的低分辨率显微图像, 结合 G-S 相位迭代反演算法, 重建大孔径衍射光场复振幅, 最终获得样品的高分辨率图像。图像视场是由低倍率物镜决定, 远高于等数值孔径的高倍率物镜视场。

## 2.2 照明光强校正问题

根据光的衍射原理和阿贝角谱成像理论<sup>[16-17]</sup>, 图 1 中正入射和斜入射照明光波的光强应保持一致, 即对图 2 所示装置而言, 每个 LED 灯珠在照明样品时, 波矢方向的光强应相同。但实际上灯珠的发光强度随角度的增加而减小<sup>[17-18]</sup>, 研究表明, 发光光强与出射角度间的函数关系为<sup>[19]</sup>

$$I_{\alpha} = I_0 \cos^m \alpha, \quad (1)$$

式中  $\alpha$  为灯珠发光面法线与发射光线之间的夹角,  $I_0$  为  $\alpha=0$  (即 LED 灯中心轴方向) 时的最大发光强度,  $m$  为大于 1 的实数。由(1)式可知, 角度越大光强越低, 不同角度照明的光强不一致, 导致重建图像质量下降。因此, 在利用 G-S 算法进行相位反演迭代计算过程中, 有必要根据 LED 不同灯珠的照明角度, 对拍摄到的一系列低分辨率显微图像先进行照明光强校正。

## 3 模拟仿真

### 3.1 仿真生成低分辨率图像

在不同角度照明下, 模拟仿真拍摄得到的一系列低分辨率图像。仿真初始参数设置尽可能与真实实验参数相同。模拟中样品  $O$  为 MATLAB 图例中名为“cameraman.tif”图片, 大小为  $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$ , 灰度值从 0 到 1, 如图 3 所示。LED 灯板上相邻灯珠间距为 1 cm, LED 灯板到样品的距离为 10.9 cm, 显微镜的数值孔径 NA 设置为 0.13, 物镜放大倍数设定为 4 倍, LED 照明光波长为 522.5 nm。



图 3 仿真样品

Fig. 3 Simulation sample

根据装置图 2, 从 LED 灯板阵列中任意一个灯珠发射一束  $k_i$  方向的近似平面波, 传播到样品处 ( $z=0$ ) 的复振幅用  $p_i$  表示为

$$p_i = A_{mp} \exp [j(k_{ix}x + k_{iy}y)], \quad (2)$$

式中  $A_{mp}$  为振幅,  $j$  为虚数单位,  $i=1, 2, 3, \dots$  为 LED 灯珠序号。以正中心灯珠位置 ( $k_{1x}=0, k_{1y}=0$ ) 为起点, 按逆时针顺序, 回字形依次单独点亮每个灯珠照射样品, 经过样品产生衍射光波, 经显微物镜在 CCD 光敏面成像, 得到一系列低分辨率图像  $I_{li}$ 。

首先模拟仿真不同角度照明光强均一时, CCD 拍摄到的一系列低分辨率图像。设(2)式中  $p_i$  的振幅均为同一数值, 且  $A_{mp}=1$ , 将照射平面波  $p_i$  和样品  $O$  相乘后进行傅里叶变换, 得到频谱  $G_{li}$ 。根据参数设置, 模拟物镜光传递函数, 生成半径为  $r=2\pi NA/\lambda$  的圆形滤波窗, 中心位于频谱正中,  $r \leq 2\pi NA/\lambda$  时, 其值为 1(低通),  $r > 2\pi NA/\lambda$ , 值为全零。运用此滤波窗对频谱  $G_{li}$  进行滤波, 得到一系列低分辨率图像的频谱  $G_{li}$ , 再对频谱  $G_{li}$  进行傅里叶逆变换得到一系列图像, 此为物镜成像模拟过程。由于这些图像大小仍为  $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$ , 因此, 根据采样定理模拟 CCD 对光信号的采集过程, 需对其进行下采样, 每 5 个点进行一次积分平均, 边缘不足 5 点时补 0, 像素尺寸缩小约 5 倍, 得到一系列  $103 \text{ pixel} \times 103 \text{ pixel}$  的低分辨率图像  $I_{li}$ 。在此情况下模拟拍摄  $7 \times 7$  个灯珠分别发光, 得到 49 张低分辨率图像, 图 4 给出了其中的第 1 张[图 4(a)]、第 5 张[图 4(b)]和第 24 张[图 4(c)]图像, 其中第 1 张对应的灯珠位置为  $k_{1x}=0, k_{1y}=0$ 。



图 4 模拟均一照明下拍摄所得低分辨率图

Fig. 4 Simulated low-resolution images under the uniform illumination

同理模拟仿真不同角度照明光强非均一时, CCD 拍摄到的一系列低分辨率图像。再根据(1)式计算振幅  $A_{mp}$ , 模拟在相同曝光时间下, 光强根据 LED 灯珠位置随照射角度  $\alpha$  的增大而减小。根据(1)式, 设最大光强  $I_0=1$ , 那么振幅  $A_{mp\alpha} = \sqrt{\cos^m \alpha}$ 。当  $m=30$  时, LED 的发光强度随角度分布如图 5 所示, 角度越大发光光强越低, LED 灯中心轴方向发光光强最大。在此情况下, 模拟拍摄  $7 \times 7$  个灯珠分别发光, 得到 49 张低分辨率图像, 图 6 给出了其中的第 1 张[图 6(a)]、第 5 张[图 6(b)]和第 24 张[图 6(c)]图像, 其中第 1 张对应的灯珠位置为  $k_{1x}=0, k_{1y}=0$ 。

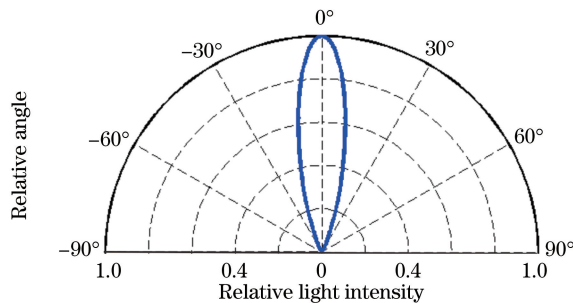


图 5 LED 发光强度角度分布

Fig. 5 Distribution of the LED luminous intensity

## 3.2 仿真重建

### 3.2.1 FPM 的重建过程

获取了不同角度照明的低分辨率图像后, 就可以利用 G-S 算法进行傅里叶叠层仿真重建。下面简述基于 G-S 算法 FPM 的重建过程<sup>[1]</sup>。

1) 设置初始猜测的高分辨复振幅图像为  $\sqrt{I_h(x, y)} \exp [i\varphi_h(x, y)]$ 。通过对  $k_{1x}=0, k_{1y}=0$  位置拍



图6 模拟非均匀光照下拍摄所得图片

Fig. 6 Simulated images under the non-uniform illumination

摄到的低分辨率强度图像  $I_{l1}$  (如  $103 \text{ pixel} \times 103 \text{ pixel}$ ), 进行上采样后开方, 获取初始猜测的高分辨率图像 (像素数提高 5 倍,  $515 \text{ pixel} \times 515 \text{ pixel}$ ) 的振幅  $\sqrt{I_h(x, y)}$ , 相位  $\varphi_h(x, y)$  可设置为任意值。再对其进行傅里叶变换, 得到初始猜测的高分辨率复振幅图像的频谱。

2) 在猜测的高分辨率图像频谱中  $k_x=0, k_y=0$  的位置, 用半径为  $2\pi NA/\lambda$  (换算成像素单位) 的窗口进行低通滤波 (挖取低频部分), 经过过程①: 傅里叶逆变换得到复振幅图像 **A**; 再经过过程②: 保留复振幅图像 **A** 的相位, 用在拍摄到的强度图像 **B** 的平方根替换其振幅, 得到新的复振幅图像 **C**; 最后经过过程③: 对复振幅图像 **C** 进行傅里叶变换得到频谱, 仍使用半径为  $2\pi NA/\lambda$  的滤波窗取出, 填充回频谱的原有位置中, 进而达到频谱更新。

3) 重复按照第 2) 步的方法, 依次取中心位于  $k_{ix}$  和  $k_{iy}$  ( $i=2, 3, \dots, N$ ) 各处频谱, 对其他频谱部分进行迭代更新, 顺序为逆时针回字形, 直至得到一张包含所有拍摄图像信息的频谱。此过程中为了满足迭代收敛关系, 在拍摄不同角度低分辨图像时, 需要保证第  $i$  个频谱与第  $(i+1)$  个频谱之间有一定的重叠部分。

4) 重复第 2) 步和第 3) 步直至达到收敛, 得到最终的合成频谱图 **D**。

5) 对最终频谱 **D** 作傅里叶逆变换, 得到复振幅图像, 计算其强度得到重建的高分辨率图像 **E**。

### 3.2.2 光强校正仿真重建

为了探讨不同角度照明光强校正的必要性, 进行了以下三种情况的仿真重建: 1) 不同角度照明光强不均一情况下, 没有进行光强校正时的仿真重建; 2) 不同角度照明光强不均一情况下, 利用照明光强校正算法进行光强校正后的仿真重建; 3) 不同角度照明光强均一情况下的仿真重建。

照明光强校正算法<sup>[20]</sup> 简述如下: 在不均一照明情况下进行重建时, 在进行上述第 2) 步重建步骤中的过程②之前, 先对拍摄到的图像 **B** 进行照明强度校正, 再根据图像 **A** 的强度来调整图像 **B** 的强度, 得到校正后的图像 **B'**, 即

$$I_{B'}(x, y) = I_B(x, y) \frac{\sum I_A(x, y)}{\sum I_B(x, y)}, \quad (3)$$

式中  $I_{B'}(x, y)$  表示校正后图像 **B'** 的强度值,  $I_A(x, y)$  表示图像 **A** 的强度值,  $I_B(x, y)$  表示拍摄到的图像 **B** 的强度值,  $\Sigma$  符号表示对  $(x, y)$  平面内所有像素的强度值求和,  $\sum I_A(x, y) / [\sum I_B(x, y)]$  是强度校正系数。在重建第 3)~5) 步骤, 都要按照这一算法, 对所有拍摄到的低分辨图像预先进行强度校正。校正(3)式的提出, 主要是基于 G-S 迭代反演算法, 即通过不断迭代运算, 对结果不断修正的算法, 那么如果光强不匹配, 则在迭代过程中, 也就可以通过(3)式对光强进行不断的修正。

对 3.1 节中模拟仿真所得到的两组图像, 按照上述重建步骤分别进行重建, 结果如图 7 所示。其中图 7(a) 和 (b) 均为不同角度照明光强不均一情况下采用图 6 得到的重建结果, 图 7(a) 为未进行光强校正直接重建的结果, 图 7(b) 为经过光强校正的重建结果, 图 7(c) 为采用图 4 得到的重建结果。根据图 7 中的局部放大图可以看出, 图 7(a) 的头像耳部轮廓较为模糊, 图 7(b) 头像耳部相对清晰, 图 7(c) 中头像整体最为清晰。可以明显看出, 经过强度校正的重建图 7(b) 效果优于没有经过强度校正的重建图 7(a), 这充分说明了进行照明光强校正的必要性。图 7(a) 显得模糊, 也就是高频信息更少, 这是由于 LED 发光光强随角度  $\alpha$  的增大而减小, 未经任何处理直接进行重建, 导致重建过程中高频信息的权重变小。

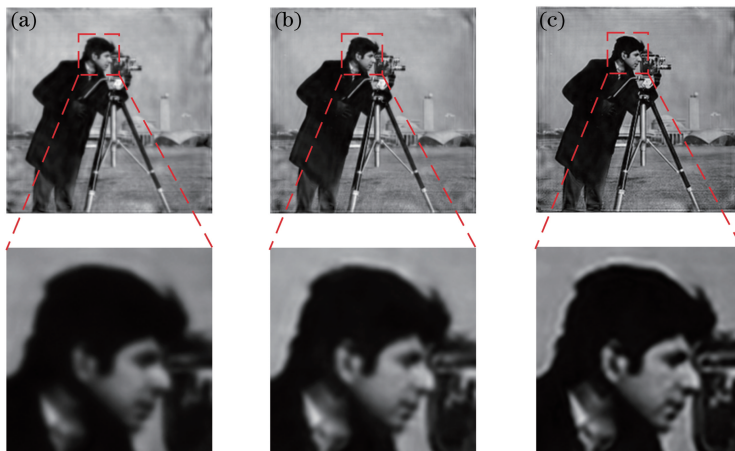


图7 非均一与均一照明下的重建结果

Fig. 7 Reconstruction results under non-uniform and uniform illumination

## 4 实验结果

通过实验进一步验证照明光强校正的必要性。实验使用尼康 80i 生物显微镜。利用 4 倍显微物镜 ( $NA$  为 0.13) 进行成像; 由于明场与暗场的光强差距较大且暗场信号较弱, 需要采用高动态范围及噪声较小的数码相机拍摄, 实验中采用致冷科学 CMOS 相机进行拍摄, 相机型号为 Neo5.5 (ANDOR), 模/数转换为 16 bit; 使用 USAF 标准版作为实验样品; 在物理上对 LED 灯照明光强进行校正, 即每次 LED 灯照明样品时, 使 LED 灯的中心轴方向和图 2 所示的  $k_i$  矢量方向保持一致, 这样就能保证不同  $k_i$  矢量方向的照明光强一致, 无需在算法上进行光强校正。LED 灯发光波长为 522.5 nm, 放置于样品正下方, 垂直距离为 7.8 cm。相邻两个灯珠的间距为 0.695 cm, 总数为共 81 盏。拍摄 81 盏灯单独照明样品, 得到 81 张低分辨率图像。图 8 分别给出了其中的第 1 张[图 8(a)]、第 11 张[图 8(b)]和第 46 张[图 8(c)]拍摄图片。

按照 3.2.1 节的 5 步重建过程进行重建, 结果如图 9(a) 所示。可以较明显地分辨出最里圈 8、9 级的数值和条纹, 而用 4 倍物镜中心单灯直接拍摄的图像则无法分辨[图 8(a)]。作为对比, 图 9(b) 给出了采用 20 倍物镜 ( $NA$  为 0.5) 的拍摄的图片。

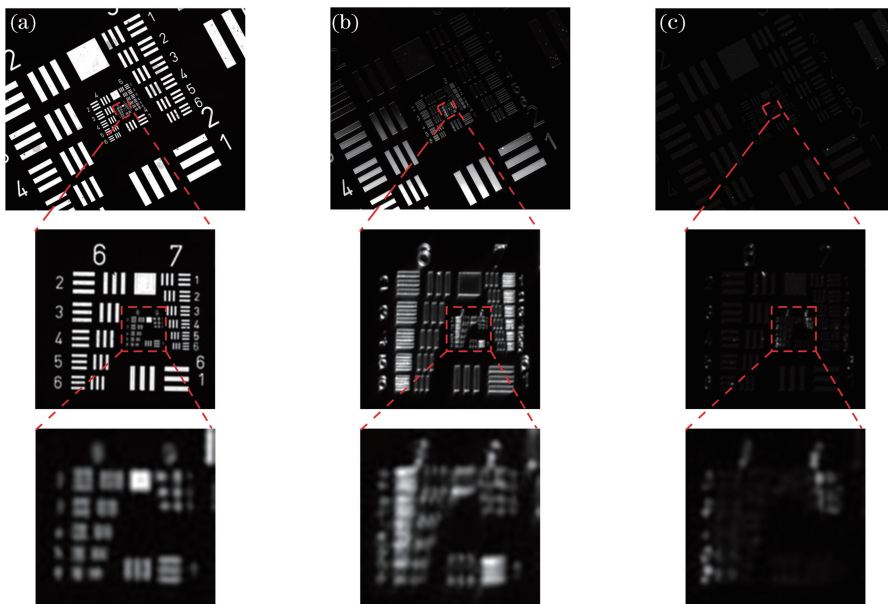


图8 不同的单灯拍摄到的图片

Fig. 8 Images captured by different single lights

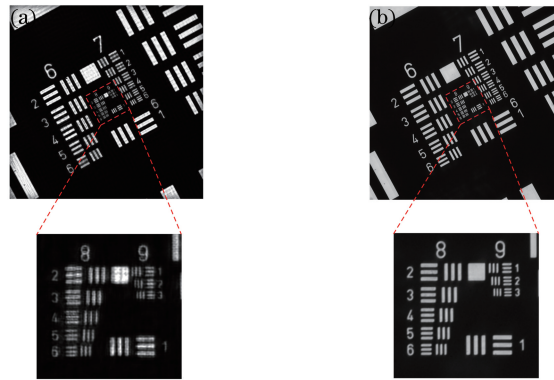


图9 (a)重建结果;(b) 20倍镜拍摄图

Fig. 9 (a) Reconstruction result; (b) captured image under 20 $\times$  objective

## 5 结 论

FPM作为一种综合孔径计算成像技术,可以获得宽视场大像素的高分辨率显微图像。但是这种技术采用可编程LED阵列进行角度照明,而照明光强随角度的增大而减弱。通过计算机模拟仿真证明,在重建过程中,需要对不同角度照明光强进行校正,否则将导致重建图像质量下降,同时在实验上也验证了不同角度照明光强校正的必要性。

## 参 考 文 献

- [1] Zheng G, Horstmeyer R, Yang C. Wide-field, high-resolution Fourier ptychographic microscopy[J]. Nature Photonics, 2013, 7(9): 739-745.
- [2] Ou X, Zheng G, Yang C. Embedded pupil function recovery for Fourier ptychographic microscopy[J]. Optics Express, 2014, 22(5): 4960-4972.
- [3] Tian L, Li X, Ramchandran K, *et al.* Multiplexed coded illumination for Fourier ptychography with an LED array microscope[J]. Biomedical Optics Express, 2014, 5(7): 2376-2389.
- [4] Bian Z, Dong S, Zheng G. Adaptive system correction for robust Fourier ptychographic imaging[J]. Optics Express, 2013, 21(26): 32400-32410.
- [5] Bian L, Suo J, Zheng G, *et al.* Fourier ptychographic reconstruction using Wirtinger flow optimization[J]. Optics Express, 2015, 23(4): 4856-4866.
- [6] Zheng G, Ou X, Horstmeyer R, *et al.* Characterization of spatially varying aberrations for wide field-of-view microscopy[J]. Optics Express, 2013, 21(13): 15131-15143.
- [7] Ou X, Horstmeyer R, Yang C, *et al.* Quantitative phase imaging via Fourier ptychographic microscopy[J]. Optics Letters, 2013, 38(22): 4845-4848.
- [8] Zuo Chao, Chen Qian, Sun Jiasong, *et al.* Non-interferometric phase retrieval and quantitative phase microscopy based on transport of intensity equation: a review[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(6): 0609002.  
左超, 陈钱, 孙佳嵩, 等. 基于光强传输方程的非干涉相位恢复与定量相位显微成像: 文献综述与最新进展[J]. 中国激光, 2016, 43(6): 0609002.
- [9] Xie Zongliang, Ma Haotong, Ren Ge, *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, 任一戈, 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.
- [10] Suo J, Ji X, Dai Q. An overview of computational photography[J]. Science China (Information Sciences), 2012, 55(6): 1229-1248.
- [11] Xu Shukui, Tu Dan, Li Guohui, *et al.* Review of computational photography[J]. Application Research of Computers, 2010, 27(11): 4032-4039.  
徐树奎, 涂丹, 李国辉, 等. 计算摄影综述[J]. 计算机应用研究, 2010, 27(11): 4032-4039.
- [12] Fienup J R. Phase retrieval algorithms: a comparison[J]. Applied Optics, 1982, 21(15): 2758-2769.

- [13] Maiden A M, Rodenburg J M. An improved ptychographical phase retrieval algorithm for diffractive imaging [J]. *Ultramicroscopy*, 2009, 109(10): 1256-1262.
- [14] Rogstad D H. A technique for measuring visibility phase with an optical interferometer in the presence of atmospheric seeing [J]. *Applied Optics*, 1968, 7(4): 585-588.
- [15] Wang Haitao, Zhou Bifang. Optical synthesis aperture interference image technology [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, 10(5): 434-442.  
王海涛, 周必方. 光学综合孔径干涉成像技术 [J]. *光学精密工程*, 2002, 10(5): 434-442.
- [16] Goodman J W. Introduction to Fourier optics [M]. Qin Kecheng, Liu Peisen, Lu Jiajian, *et al.* Transl. 3rd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005.  
Goodman J W. 傅里叶光学导论 [M]. 秦克诚, 刘培森, 陆家健, 等, 译. 3 版. 北京: 电子工业出版社, 2011.
- [17] Cheng Hong, Shen Chuan, Zhang Cheng, *et al.* Phase retrieval algorithm combining transport of intensity equation and angular spectrum iterative [J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(6): 0609001.  
程 鸿, 沈 川, 张 成, 等. 强度传输方程和角谱迭代融合的相位检索算法 [J]. *中国激光*, 2014, 41(6): 0609001.
- [18] Tu Dawei, Wu Rengmao, Yang Hengliang, *et al.* Effect of optical structure on output light intensity distribution in LED package [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(5): 832-838.  
屠大维, 吴仍茂, 杨恒亮, 等. LED 封装光学结构对光强分布的影响 [J]. *光学精密工程*, 2008, 16(5): 832-838.
- [19] Huo Yanming, Wu Shumei, Tan Junting, *et al.* Distribution characteristics of LED arrays based on MATLAB [J]. *Journal of Applied Optics*, 2009, 30(2): 191-194.  
霍彦明, 吴淑梅, 谭峻廷, 等. 基于 MATLAB 的 LED 阵列的研究与仿真 [J]. *应用光学*, 2009, 30(2): 191-194.
- [20] Bian Z, Dong S, Zheng G. Adaptive system correction for robust Fourier ptychographic imaging [J]. *Optics Express*, 2013, 21(26): 32400-32410.