

关于轴向距离误差对 PIE 成像质量影响的研究

郑 晨¹ 何小亮¹ 刘 诚¹ 王跃科¹ 王继成¹ 朱健强²

(¹ 江南大学理学院光电信息科学与工程系, 江苏 无锡 214122)
(² 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 在对拓展重叠关联迭代引擎算法(ePIE)成像的轴向距离偏差问题进行详细分析的基础上指出,轴向距离偏差对再现图像所造成的影响在本质上和横向扫描步长误差所造成的影响完全一样;用含有位置搜索的 ePIE 算法进行图像重建时,轴向距离偏差所造成的影响理论上可以自动得以更正。

关键词 傅里叶光学;相干衍射成像;相位恢复;成像系统

中图分类号 TP212.1 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201434.1011003

A Study on the Influence of the Axial Distance Error to the Image Quality of the Ptychographic Iterative Engine

Zheng Chen¹ He Xiaoliang¹ Liu Cheng¹ Wang Yueke¹ Wang Jicheng¹ Zhu Jianqiang²

¹ Department of Photoelectric Information Science and Engineering, Jiangnan University,
Wuxi, Jiangsu 214122, China

² Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract Based on the analysis of the axial distance error in the extended ptychographic iterative engine (ePIE), it is pointed out that the influence of the axial distance error to the image quality is equivalent to that of the transverse scanning error. By using the position corrected ePIE algorithm, the image quality degradation induced by the axial distance error can be automatically corrected step by step in the iterative reconstruction.

Key words Fourier optics; coherent diffraction imaging; phase retrieval; imaging system

OCIS codes 110.0310; 050.1940; 110.0180

1 引 言

相干衍射成像技术(CDI)^[1-2]是为了解决 X 射线和电子束等短波长成像领域中高性能光学元件的缺乏问题而发展出来的非透镜成像技术,由于它没有使用透镜等光学元件,因此成像分辨率不受元件质量限制,理论上可以达到衍射极限分辨率,是短波长成像领域中的常用技术。但传统的 CDI 技术往往在成像视场和收敛速度等方面存在明显不足,因此实际应用范围受到较大限制。为了克服传统 CDI 的不足,2004 年,谢菲尔德大学 Rodenburg 等^[3-8]提出重叠关联迭代引擎算法(PIE)技术,该技术通

过物体和照明光之间的相对移动在远场探测器表面形成一组衍射斑,将这些衍射斑记录后对其采用相应的算法进行处理,可准确地重建出被测物体的振幅和相位信息。和其他相干衍射成像技术相比较,PIE 具有收敛快、视场大、可靠性高等系列优点,目前已经在可见光、X 射线、和电子束成像领域实现并得到大量研究,是一种非常有前途的相位成像技术^[9-13]。PIE 理论的发展过程中曾存在三个方面的技术难点:1)照明光的空间分布函数难以准确测量;2)物体相对照明光的位置不可能绝对准确确定;3)物体到电荷耦合器件(CCD)的记录距离不可能绝对

收稿日期: 2014-03-20; **收到修改稿日期:** 2014-04-24

基金项目: 江苏省自然科学基金(SBK201220213)、江南大学自主科研基金(JUSRP211A20)

作者简介: 郑 晨(1990—),男,硕士研究生,主要从事光学测量方面的研究。E-mail: icemantomcat0126@gmail.com

导师简介: 刘 诚(1971—),男,博士,研究员,主要从事光学成像与测量等方面的研究。

E-mail: cheng.liu@hotmail.co.uk(通信联系人)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

精确。经过近十年的发展,目前这三个技术难点的前两个已得到克服。2009年,Andrew等^[14]提出了拓展重叠关联迭代引擎算法(ePIE)代替标准的PIE,该算法在迭代过程中可对物体和照明光同时更新,可使二者同时收敛到各自的真实分布,从而不再需要对照明光进行精确预测,PIE技术的实用性因而得到大幅度提高。2012年,Zhang等^[15-16]分别提出了空间相关算法和退火算法来搜索物体和照明光间的准确相对位置,两种理论基本都可以消除定位精度对PIE成像质量的影响,从而使PIE成像的第二个技术难题得以解决。而对PIE的第三个技术难点,即CCD和被成像物体间的距离误差对成像质量的影响问题,国内外一直都还没有相关的研究报道,到目前为止还没有很好的处理方法。对于实际的实验研究来说,轴向距离误差会使再现的图像发生模糊并引起分辨率降低,目前采用的做法只能是尝试采用多个记录距离进行图像重建并以其中最清楚的一个像作为真正再现结果,因此操作存在一定的盲目性,严重影响PIE性能的提高。

为了解决PIE成像在记录距离方面的技术难题,本文对轴向距离误差影响PIE成像质量的物理机制进行了细致的理论分析,结果表明轴向距离误差对成像质量的影响可以看作通过影响照明光的分布和扫描步距而间接进行,在此基础上本文指出通过联合应用拓展PIE和位置搜索算法,记录距离误差所带来的影响理论上完全可得以消除,从而为PIE成像最后一个技术难题的最终解决提供了一个新的思路。在进行详细的理论分析的同时,给出了系列的数值模拟验证,数值模拟结果和理论分析完全吻合。

2 研究内容与结果

2.1 PIE成像基本原理

图1为PIE成像的原理示意图。一束照明光(包括可见光、X射线、电子束)通过一个小孔照射到一个二维平面物体表面形成照明光斑 $P(x,y)$,照明光束透射过物体后经菲涅尔传播至CCD表面形成远场衍射斑。在PIE数据采集的过程中,物体按照二维扫描方式和照明光发生相对移动,并在每个

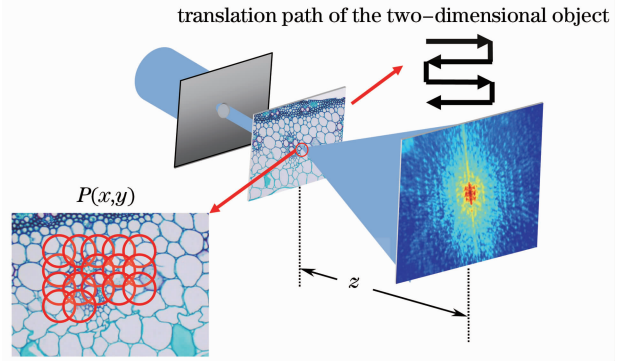


图1 PIE原理图

Fig. 1 Principle of PIE method

相对位置处采集相应的散射斑,并通过迭代算法重建出二维像。标准的PIE理论要求准确知道照明光的分布函数,这对于很多的实验研究来说有一定的难度,为此Maiden^[14,17]提出ePIE算法来同时恢复出物体透射函数和照明光函数。照明光的问题被ePIE理论彻底解决后,扫描过程中的机械回程误差或者压电晶体的磁滞效应所带来的定位精度不准问题成为影响PIE成像精度的最大因素,为了解决这个问题Maiden和Zhang分别提出了PIE退火算法和图像相关配准算法^[18-19],以在迭代重建过程中找出物体和照明光的准确位置实现位移误差的校正。假设第 $n+1$ 次迭代中重建的物体分布为 $O_{n+1}(r, p_k)$,其中 r 表示物面的坐标分布, p_k 表示此时物体第 k 个被照明区域的位移,采用图像相关配准算法来实现位置校正的ePIE的重建步骤如下[在迭代开始赋予物体和照明光的初始假设值 $O_0(r), P_0(r)$]:

- 1) 将第 n 次重建出的物体信息 $O_n(r, p_k)$ 同照明光函数 $P_n(r)$ 相乘得到透射函数 $\Psi_n^k(r)$;
- 2) 根据标量衍射理论将 $\Psi_n^k(r)$ 传播至CCD面,得到相应的衍射斑函数 $I_n^k(u) = F\{\Psi_n^k(r)\}^2$,式中 F 代表傅里叶变换算符, u 表示CCD面坐标分布;
- 3) 在CCD面对做强度限制,即将CCD实际记录到的散射斑的强度 $\sqrt{I(u)}$ 替换 $I_n^k(u)$ 的强度值,得到更新后的记录平面散射斑函数 $I_n^k(u)$;
- 4) 将 $I_n^k(u)$ 逆向传回到物平面得到新的物体透射函数 $\Psi_n^k(r)$,并在物面上按更新物函数和照明光函数,假设在第 n 次迭代时,更新函数为

$$\begin{cases} O_{n+1}(r, p_k) = O_n(r, p_k) + \frac{P(r)}{P_{\max}(r)} * \frac{P^*(r)}{P(r) + \alpha} * \beta [\Psi_n^k(r) - \Psi_n^k(r)] \\ P_{n+1}(r) = P_n(r) + \frac{O(r, p_k)}{O_{\max}(r, p_k)} * \frac{O^*(r, p_k)}{O(r, p_k) + \alpha} * \beta [\Psi_n^k(r) - \Psi_n^k(r)] \end{cases}, \quad (1)$$

式中 α 和 β 均取 $0 \sim 1$ 之间的常数。 $P * (r)$ 和 $O * (r)$ 分别表示照明光 $P(r)$ 和物体 $O(r)$ 分布的共轭；

5) $O_{n+1}(r, p_k)$ 和 $O_n(r, p_k)$ 之间的位移误差 $e_{n,k}$ 可以通过寻找

$$\text{Corr}(t) = \sum_r O_{n+1}(r, p_k) \cdot \Lambda_n(r) \cdot O^*(r-t, p_k) \cdot \Lambda_n^*(r-t), \quad (2)$$

相关运算的峰值来确定，式中的 $\Lambda_n(r)$ 表示物体有效照明的区域。通过找出每次照明位置与物体的位移误差，对重建函数的位置进行调整，使得 $O_n(r, p_k)$ 的位置始终向相关系数最大的位置移动；

6) 将更新后的照明光和位置调整后的物体透射函数和作为下次迭代物光和照明光的假设值，重复步骤 2)~5)，直到准确地收敛出物体的振幅与相位信息。

2.2 轴向距离误差的理论分析

假设物体的分布为 $O(x_0, y_0)$ ，照明光函数为 $P(x_0, y_0)$ ，两者的乘积为 $U_0(x_0, y_0) = O(x_0, y_0) \cdot P(x_0, y_0)$ ，记录平面和样品之间的距离为 z ，设探测平面的坐标为 (x, y) ，根据菲涅尔衍射理论透射光传播至探测平面所形成的分布为

$$U(x, y) = \iint U_0(x_0, y_0) \exp\left[j \frac{k}{2z}(x_0^2 + y_0^2)\right] \exp\left[-jk \frac{2\pi}{\lambda z}(x_0 x + y_0 y)\right] dx_0 dy_0. \quad (3)$$

在实际的实验中真实传播距离不可能完全准确的知道，若设重建过程中所采用的传播距离为 αz ，则计算所得的探测器平面上的散射斑分布为

$$U(x, y) = \iint U_0(x_0, y_0) \exp\left[j \frac{k}{2\alpha z}(x_0^2 + y_0^2)\right] \exp\left[-jk \frac{2\pi}{\lambda \alpha z}(x_0 x + y_0 y)\right] dx_0 dy_0. \quad (4)$$

由于图像重建时需要令(3)式和(4)式的模相等，为了找出两式相等的条件，可对(4)式进行坐标变换：

$$\begin{aligned} x' &= \alpha x_0, \\ y' &= \alpha y_0, \end{aligned}$$

因此，(2)式可以写成：

$$U(x, y) = \frac{1}{\alpha^2} \iint U_0\left(\frac{x'}{\alpha}, \frac{y'}{\alpha}\right) \exp\left[j \frac{1-k}{2(\alpha z)}(x'^2 + y'^2)\right] \exp\left[-j \frac{2\pi}{\lambda(\alpha z)}(x'x' + y'y')\right] dx' dy', \quad (5)$$

由于 $\exp\left[j \frac{1-k}{2(\alpha z)}(x'^2 + y'^2)\right] = \exp\left[j \frac{k}{2(\alpha z)}(x'^2 + y'^2)\right] \exp\left[j \frac{1-\alpha}{\alpha} \frac{k}{2(\alpha z)}(x'^2 + y'^2)\right]$ ，(5)式可以写成

$$U(x, y) = \frac{1}{\alpha^2} \iint U_0\left(\frac{x'}{\alpha}, \frac{y'}{\alpha}\right) \exp\left[j \frac{1-\alpha}{\alpha} \frac{k}{2(\alpha z)}(x'^2 + y'^2)\right] \exp\left[j \frac{k}{2(\alpha z)}(x'^2 + y'^2)\right] \times \exp\left[-j \frac{2\pi}{\lambda(\alpha z)}(x'y' + y'y')\right] dx' dy', \quad (6)$$

(6) 式是一个分布函数为 $U_0\left(\frac{x'}{\alpha}, \frac{y'}{\alpha}\right) \exp\left[j \frac{1-\alpha}{\alpha} \frac{k}{2(\alpha z)}(x'^2 + y'^2)\right]$ 的光场在距离为 αz 处所形成的衍射的标准菲涅尔公式，这说明在实际记录距离和重建距离不相等的情况下，利用 PIE 完全可以得到一个清晰的重建像，但所获得的重建像和实际的图像相比存在一个和距离误差相关的空间尺寸缩放因子 α ，同时所获得照明光也需要有一个相应的缩放 α 外还多出一个相应的二次调制相位 $\exp\left[j \frac{1-\alpha}{\alpha} \frac{k}{2(\alpha z)}(x'^2 + y'^2)\right]$ 。为了验证(6)式推论，对一个纯振幅样品进行了数值模拟计算。图 2(a)中的单子叶生物细胞图片是模拟所用的样品的振幅分布，其中右上角插入的小图表示样品平

面上照明光的强度分布。照明光波长被假定为 635 nm，物体到探测平面间的实际距离假定为 5 cm，扫描步长假定为 40 pixel，一个像素长度设定为 8.3 μm ；将照明光相对样品做 8×8 次扫描并记录下 64 个散射斑后，可利用标准的 PIE 理论进行图像重建。在各参数都完全准确的情况重建图像和图 2(a)完全一样。当重建距离为 2.5 cm 即为实际距离一半时，采用标准的 PIE 算法进行重建所得到的结果在图 2(b)中给出，其中右上角的小图是其中一个散射斑的强度分布，由于距离和实际记录距离相差过大，重建结果不能反映出样品的任何细节结构信息。而按照(6)式要求，将原照明光缩小一半并乘以

相位因子 $\exp\left[j\frac{k}{2(0.5z)}(x'^2+y'^2)\right]$ 作为新的照明光,并将扫描步长改为 20 pixel 时,标准 PIE 的重建结果如图 2(c)所示。比较图 2(a)和图 2(c)可以发

现,除了比例缩小一倍外,二者完全相同。这个结果和(4)式的推论完全相同,证明了上述分析的正确性。

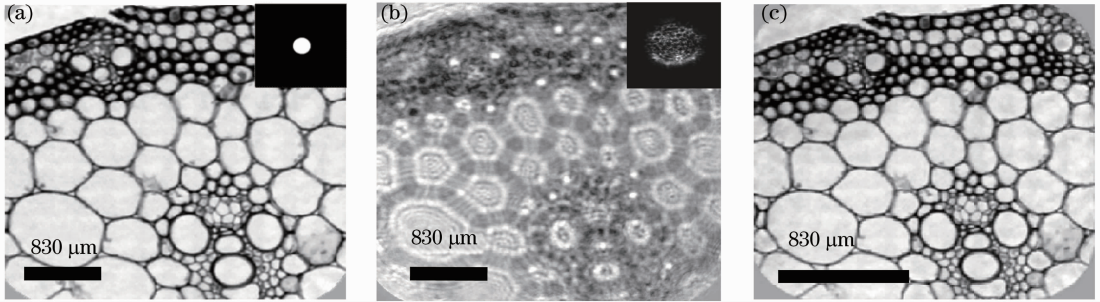


图 2 (a)模拟所用的样品的振幅分布,黑色粗线表示 100 个像素长度,右上角的小图表示样品平面上照明光的强度分布;
(b)再现距离减为实际距离的一半时,采用标准 PIE 进行重建所得到的结果,右上角的小图是其中一个散射斑的强度分布,黑色粗线表示 100 个像素长度;(c)将扫描步长缩短一半,标准 PIE 的重建结果

Fig. 2 (a) Amplitude for simulation, the black bar represent length of 100 pixel, inset in the upper right corner is the probe amplitude; (b) reconstructed image by PIE method when setting the retrieval distance half of the actual distance, inset in the upper right corner is one of the diffraction patterns; (c) reconstructed image with PIE method after revising probe and shortening scan step by half

2.3 位置搜索下的 ePIE 对轴向距离误差的矫正效果

上述的理论分析和数值计算结果表明,当重建过程中所应用的轴向距离和实际记录距离间存在误差时,用修正后的照明光和扫描间隔完全可以得到一个准确的再现像,而且所获得的重建像和实际图像相比只有因缩放比例造成的大小不同。对于实际的实验研究来说,当用 ePIE 理论进行重建时并不需要准确知道照明光的确切分布函数,随着迭代的进行照明光将逐渐收敛并产生清晰的重建图像。也即,用 ePIE 进行图像重建时,迭代所得到的照明光中可以自动包含(6)式中相位调制系数。另一方面,步长的调整等同于重建像的位置误差,实际的实验

研究中,重建过程中所采用的传播距离和实际的记录距离间差别一般不会很大,步长的所需要的修改也相应很小,因此其可以用位置搜索算法进行自动更正。综合以上两方面因素可以猜测,若采用包含位置搜索算法的 ePIE 理论进行图像重建,即使所采用的记录距离不准,重建图像质量仍然可以非常清晰,即距离不准的影响将可以自动得以更正。

为了验证这个模型的正确性,做了另外一组数值模拟计算。模拟实验中仍然设定照明光为波长为 635 nm 的平行光,被成像物体仍为图 2(a)所示的纯振幅物体,物体到 CCD 面的距离仍假定为 5 cm,且数据记录过程中扫描步长为 40 pixel。在进行图

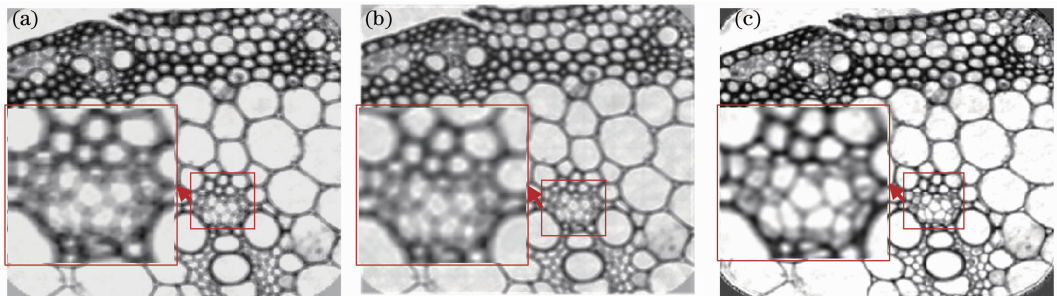


图 3 (a)标准 PIE 在 4.7 cm 的距离再现的物体信息,物体细节部分信息在图中左边红框处放大;(b)用 ePIE 再现出来的物体的重建像,物体细节部分信息在图中左边红框处放大;(c)采用包含位置搜索算法的 ePIE 理论所得到的再现结果,物体细节部分信息在图中左边红框处放大

Fig. 3 (a) Reconstructed image via normal PIE at reconstruction distance of 4.7 cm, details information of object is shown in the red box; (b) reconstructed image via ePIE at reconstruction distance of 4.7 cm; (c) reconstructed image via ePIE with translation position determination method

像重建时将再现距离缩短至 4.7 cm 以模拟实际实验中的距离测量误差,图 3(a)为采用标准 PIE 再现所得到的结果,将其和图 2(a)相比可以看出,一些图像细节结构较为模糊。图 3(b)为采用 ePIE 所得到的结果,由于照明光一定程度上得以更正,图像质

量相对于图 3(a)有一点点的提高,但改善效果并不明显;图 3(c)采用包含位置搜索算法的 ePIE 理论所得到的再现结果,根据上述的理论分析,由于照明光和位置都已经得到调整,所以图 3(c)和图 2(a)中的原图非常相近,细节结构也非常清楚。

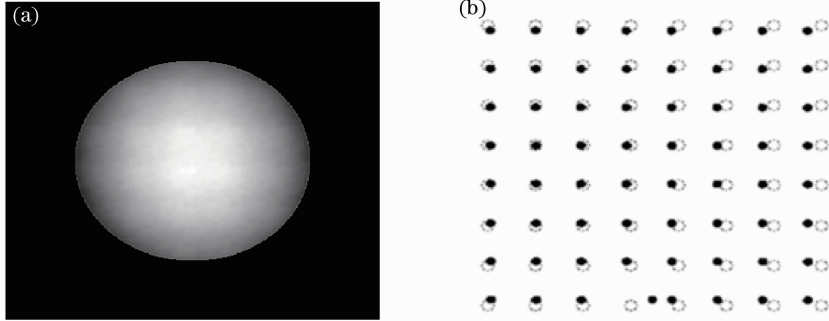


图 4 (a)物体表面上实际的照明光相位和再现所得的照明光间的相位差;(b)所提方法找出的实际照明位置和普通 PIE 再现后所得到的照明位置间的关系,其中空心圆圈表示实际照明位置阵列,而实心圆圈表示用含位置搜索算法的 ePIE 理论再现所得的照明位置

Fig. 4 (a) Phase difference between phase of actual probe and reconstructed probe by ePIE; (b) positions results in ePIE with translation position determination (hollow circles) and computed positions with normal PIE (solid circles)

根据上述的理论分析,用含位置搜索算法的 ePIE 理论进行图像重建时,所得到的照明光应该比实际的照明光多一个二次相位因子,为了验证这一点,图 4(a)给出了物体表面上实际的照明光相位和再现所得的照明光间的相位差,从中可以明显看到一个相位曲面分布,这从侧面进一步验证了上述理论分析的正确性。上述的理论分析还表明,记录距离不准确条件下用含位置搜索算法的 ePIE 理论进行再现时,扫描步长有一个相应的缩放,而根据数值模拟的参数,步长的缩放应该为 0.94,即所有的照明位置都应该相对于实际位置向内收缩。图 4(b)显示了实际照明位置和再现后所得到的照明位置间的关系,其中空心圆圈表示实际照明位置阵列,而实心圆圈表示用含位置搜索算法的 ePIE 理论再现所得的照明位置,从中明显可以看出实心圆圈阵列相对于空心圆圈阵列明显收缩,收缩比例基本为 0.94 左右。这两个结果从侧面进一步证明了所提理论模型的正确性。

PIE 方法所得到的重建像质量较差,并且在 400 次迭代过程中图像质量没有明显的提高。图 5 中的变化曲线定量地说明了所提理论模型的正确性和有效性。

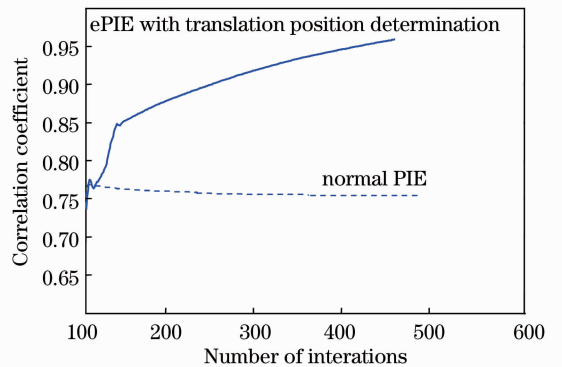


图 5 包含位置搜索算法的 ePIE 和标准 PIE 所得重建像分别与各自对应原图的相关系数曲线,实线表示含位置搜索的 ePIE 重建像的评估曲线,虚线为标准 PIE 重建像的评估曲线

Fig. 5 Correlation coefficient curve of reconstruction via new method and origin figure for simulation (solid line); correlation coefficient curve of reconstruction via normal PIE method and origin figure for simulation (dashed line)

为了量化地评估采用该方法所得重建像和原图像的差别,图 5 给出了采用理论模型的重建像与原图的相关系数随着迭代次数的变化,从中可以明显看出由于采用包含位置搜索的 ePIE,使得照明光和重建像信息同时得到更新,相关系数在采用该方法迭代 400 次后上升至 0.95 以上。图中虚线部分表示普通 PIE 下重建像与原图的相关系数随迭代次数增加的变化趋势,根据曲线可以明显看出普通

3 结 论

理论推导和数值模拟计算表明轴向距离不准给

再现图像所带来的误差和横向扫描步长不准所带来的误差数学上完全相同,如果实际距离和测量距离之比为 α ,实际扫描步长为 d ,则只要在再现过程中将步长变为将扫描步长变为 αd ,并将实际的照明光 $P(x, y)$ 变为 $P(x, y) \exp\left[j \frac{1-\alpha}{\alpha} \frac{k}{2(\alpha z)}(x^2 + y^2)\right]$,仍然可以得到清楚的再现像。对于实际的实验研究来说 α 的数值非常接近1,此时照明光的误差完全可以当作扫描步长误差处理,因此当用含有位置更正的ePIE理论进行图像重建时,轴向距离不准所造成的影响可以自动地以更正。数值分析结果完全证明了这种处理模型的正确性。

参 考 文 献

- Pan Xingchen, Liu Cheng, Zhu Jianqiang. Improved Fienup's iteration method for image reconstruction in digital holography [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(6): 0609002.
潘兴臣, 刘 诚, 朱健强. 用改进的Fienup迭代算法进行数字全息重建[J]. 光学学报, 2012, 32(6): 0609002.
- Xingchen Pan, Suhas P Veetil, Cheng Liu, *et al.*. High-contrast imaging for weakly diffracting specimens in coherent diffraction imaging [J]. Chin Opt Lett, 2013, 11(2): 021103.
- J M Rodenburg, H M L Faulkner. A phase retrieval algorithm for shifting illumination [J]. Appl Phys Lett, 2004, 85(20): 4795-4797.
- J M Rodenburg, A C Hurst, A G Cullis. Transmission microscopy without lenses for objects of unlimited size [J]. Ultramicroscopy, 2007, 107(2-3): 227-231.
- A M Maiden, J M Rodenburg, M J Humphry, *et al.*. Optical ptychography: a practical implementation with useful resolution [J]. Opt Lett, 2010, 35(15): 2585-2587.
- O Bunka, M Dierolf, S Kynde, *et al.*. Influence of the overlap parameter on the convergence of the ptychographical iterative engine [J]. Ultramicroscopy, 2008, 108(5): 481-487.
- Pan Xingchen, Lin Qiang, Liu Cheng, *et al.*. Influence of the partial coherence to the PIE imaging method [J]. Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica, 2012, 42(9): 889-898.
潘兴臣, 林 强, 刘 诚, 等. 相干性对 PIE 成像方法的影响 [J]. 中国科学:物理学 力学 天文学, 2012, 42(9): 889-898.
- Haiyan Wang, Cheng Liu, Xingchen Pan, *et al.*. Phase imaging with rotating illumination [J]. Chin Opt Lett, 2014, 12(1): 010501.
- Wang Baosheng, Gao Shumei, Wang Jicheng, *et al.*. Influence of charge coupled device saturation on PIE imaging [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(6): 0611001.
王宝升, 高淑梅, 王继成, 等. 电荷耦合器件饱和效应对 PIE 成像质量的影响 [J]. 光学学报, 2013, 33(6): 0611001.
- C Liu, T Walther, J M Rodenburg, *et al.*. Influence of thick crystal effects on ptychographic image reconstruction with moveable illumination [J]. Ultramicroscopy, 2009, 109(10): 1263-1275.
- He Xiaoliang, Liu Cheng, Wang Jicheng, *et al.*. Study on the periodic error in ptychographic iterative engine imaging [J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(3): 034208.
何小亮, 刘 诚, 王继成, 等. PIE 成像中周期性重建误差的研究 [J]. 物理学报, 2014, 63(3): 034208.
- J M Rodenburg. Ptychography and related diffractive imaging methods [J]. Advances in Imaging Electron Phys, 2008, 150: 87-184.
- Liu Haigang, Xu Zijian, Wang Chunpeng, *et al.*. Effects of synchrotron radiation X-ray beam on ptychographic coherent diffractive imaging [J]. Journal of Radiation Research and Radiation Proces, 2013, 31(6): 060801.
刘海岗, 许子健, 王春鹏, 等. 同步辐射 X 射线光斑信息对扫描相干衍射成像的影响 [J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2013, 31(6): 060801.
- A M Maiden, J M Rodenburg, *et al.*. Improved ptychographical phase retrieval algorithm for diffractive imaging [J]. Ultramicroscopy, 2009, 109(10): 1256-1262.
- F C Zhang, Isaac Peterson, J V Comamala, *et al.*. Translation position determination in ptychographic coherent diffraction imaging [J]. Opt Express, 2013, 21(11): 13592-13606.
- A M Maiden, M J Humphry, M C Sarahan, *et al.*. An annealing algorithm to correct positioning errors in ptychography [J]. Ultramicroscopy, 2012, 120(6): 64-72.
- P Thibault, M Dierolf, O Bunk, *et al.*. Probe retrieval in ptychographic coherent diffractive imaging [J]. Ultramicroscopy, 2009, 109(4): 338-343.
- M G Sicairos, J R Fienup, *et al.*. Image reconstruction by phase retrieval with transverse translation diversity [C]. SPIE, 2008, 7076: 79260A.
- M G Sicairos, S T Thurman, J R Fienup, *et al.*. Efficient subpixel image registration algorithms [J]. Opt Lett, 2008, 33(2): 156-158.

栏目编辑: 张浩佳