

基于改进 Richardson - Lucy 算法的中子照相图像几何不锐度修正方法研究

伍华杰^{1,2} 甘 隼^{3,4,5} 吕永强^{4,5} 汪启宏^{4,5} 伍一凡^{4,5} 宋 婧^{3,4,5} 凤麟核团队

1(中国科学院合肥物质科学研究院 合肥 230031)

2(中国科学技术大学 合肥 230026)

3(中科超睿技术有限公司 青岛 266041)

4(中子科学国际研究院 青岛 266199)

5(山东省中子科学技术重点实验室 青岛 266199)

摘要 中子照相系统因其特定的成像结构,使得成像后的中子照相图像不可避免地存在几何不锐度。为提升中子照相图像的质量,本文提出一种基于改进 Richardson - Lucy 算法的中子照相图像几何不锐度修正方法,该方法首先根据几何不锐度的形成原理构建点扩散函数,然后通过拉普拉斯算子和中值滤波方法去除图像中的 γ 白斑噪声,最后采用 Richardson - Lucy 算法对图像进行复原。采用线对模板样品进行测试,并与 4 种现有的中子照相图像几何不锐度修正算法进行对比,验证了本文算法可将衡量中子照相图像几何不锐度修正效果的平均梯度、空间频率指标分别提升 60.23% 和 29.90%,能够实现几何不锐度的修正,同时解决图像复原过程中 γ 白斑噪声的放大问题,为实现高分辨率的中子照相提供重要技术支撑。

关键词 中子照相图像, 图像复原, 几何不锐度, Richardson - Lucy 算法, 高分辨率

中图分类号 TL81

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.120203

A geometric unsharpness correction method for neutron photographic image based on improved Richardson - Lucy algorithm

WU Huajie^{1,2} GAN Quan^{3,4,5} LYU Yongqiang^{4,5} WANG Qihong^{4,5} WU Yifan^{4,5}
SONG Jing^{3,4,5} FDS Team

1(Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

2(University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

3(SuperRay Technology Co., Ltd., Qingdao 266041, China)

4(International Academy of Neutron Science, Qingdao 266199, China)

5(Shandong Key Laboratory of Neutron Science and Technology, Qingdao 266199, China)

Abstract [Background] Due to the specific imaging structure of neutron imaging system, the geometric unsharpness is unavoidable in neutron photographic images after imaging. [Purpose] This study aims to design a

青岛市科技计划园区培育计划项目(No.22-3-5-yqpy-3-qy)和泰山产业领军人才工程资助

第一作者: 伍华杰, 男, 1998 年出生, 2020 年毕业于江南大学, 现为博士研究生, 研究领域为中子照相图像处理

通信作者: 甘隼, E-mail: quan.gan@fds.org.cn

收稿日期: 2023-03-29, 修回日期: 2023-07-27

Supported by Qingdao Science and Technology Planning Park Cultivation Program Project (No.22-3-5-yqpy-3-qy) and the Taishan Industrial Experts Program

First author: WU Huajie, male, born in 1998, graduated from Jiangnan University in 2020, doctoral student, focusing on processing of neutron photographic image

Corresponding author: GAN Quan, E-mail: quan.gan@fds.org.cn

Received date: 2023-03-29, revised date: 2023-07-27

geometric unsharpness correction method for neutron photographic image based on improved Richardson - Lucy (RL) algorithm. **[Methods]** First, according to the geometric unsharpness of the neutron photographic image, the mathematical model of the point spread function (PSF) was established. Then, the Laplace operator and median filter were used to remove the PSF related gamma spots noise (GSN) in the image, and the neutron photographic image was restored by RL algorithm. Finally, the restoration quality of neutron photographic images of the line-pair sample was evaluated using average gradient (AG) and spatial frequency (SF). **[Results]** The results of the line-pair sample demonstrate that compared with four existing correction algorithms of geometric unsharpness, the proposed method improves AG and SF by 60.23% and 29.90%, respectively. **[Conclusions]** The proposed method of this study can effectively correct the geometric unsharpness caused by the amplification of gamma spots noise in the process of neutron photographic image restoration, providing an important technical support for performing high-resolution neutron radiography.

Key words Neutron photographic image, Image restoration, Geometric unsharpness, Richardson - Lucy algorithm, High resolution

中子照相技术作为一种对物体内部结构进行无损检测的手段,因其具有穿透能力强^[1]、轻元素灵敏、成分识别精准^[2]及抗干扰强等独特的优势,在航天航空^[3-4]、锂电池^[5-6]、混凝土建筑和非开箱安检^[7]等方面检测中都具有不可替代的重要价值。随着中子照相技术的发展,包括基于反应堆、大型加速器、小型加速器和微型中子源等的中子照相系统陆续投入研发和市场,因此中子照相无损检测具有良好的发展前景。虽然中子照相系统逐渐向微小型化发展,但由于基本的成像结构未变,中子照相图像依然存在几何不锐度,亟须开展关于几何不锐度修正的方法研究。

中子照相图像几何不锐度的修正,属于中子照相图像的复原问题,且一直是一个难点。金炜等^[8]提出一种基于小波降噪的 Richardson - Lucy (wavelet-RL)算法,假设中子照相图像中的少量噪声为高斯白噪声,采用 BivaShrink 双变量去噪模型,刻画小波变换后图像相同位置处不同尺度子带系数间的相关性,显著提升图像的去噪性能,从而提高图像几何不锐度的修正效果。Souza 等^[9-10]提出摇摆曲线 (Rocking Curve, RC) 的概念,RC 半峰全宽 (Full Width at Half Maximum, FWHM) 表示几何不锐度,并采用 Richardson - Lucy (RL) 算法进行复原,图像的前景边缘部分变得更加锐利,但是未考虑 γ 白斑噪声 (Gamma Spots Noise, GSN) 的去除。乔双等^[11]将调制核引入到正则化 RL 方法中,提出一种用于中子照相图像去模糊的方法 SK-TV-RL,能够抑制中子照相图像弱噪声的放大,并能复原图像中的细节信息。Yazid 等^[12]对 RTP (PUSPATI TRIGA Mark II) 反应堆得到的中子照相图像,采用中值滤波与 RL 结合的方法进行复原,然而直接采用中值滤波去除 GSN 会损坏图像前景的全局细节与边缘信息,

降低图像的整体复原效果。

目前,有关几何不锐度修正的研究大多集中于含有弱噪声的中子照相图像,对于含有强噪声的中子照相图像的研究较少,而在采用 RL 方法修正几何不锐度的过程中,中子照相图像中的 GSN 难以去除并会不断放大,严重影响图像的质量。因此,本文提出一种基于改进 RL 的中子照相图像几何不锐度修正算法,并与以往有关中子照相图像的几何不锐度修正算法作对比,验证采用改进的 RL 算法进行几何不锐度修正的效果。

本文采取的方法主要分为两个过程:第一步是根据中子照相图像的几何不锐度,对用于表示几何不锐度的点扩散函数 (Point Spread Function, PSF) 建立数学模型;第二步是结合第一步得出的 PSF,采用改进的 RL 方法对图像中的前景边缘细节进行复原,以达到更好的几何不锐度修正效果,提升图像的分辨率。

1 中子照相图像复原方法

实际上,中子照相系统只能获取到降质后的中子照相图像,可以大致将中子照相图像的降质过程描述为一个离散线性系统^[13]:

$$I_{\text{degraded}} = I * k + n \quad (1)$$

式中: I_{degraded} 表示降质中子照相图像; I 表示原始清晰中子照相图像; k 表示 PSF; n 表示加性噪声; $*$ 为卷积。中子照相图像的复原需要同时考虑 PSF 和加性噪声,既要准确估计 PSF,也应尽可能地去除加性噪声的干扰。

本文提出的方法中,首先根据中子源出口到像探测器的距离、中子源出口直径和被检品中心到像探测器的距离,精准地估计出中子照相图像的 PSF,然后根据中子照相图像中 GSN 的特点,提出一种改

进的RL(improved-RL)算法。算法总体流程如图1所示。



图1 算法总体流程图

Fig.1 Block diagram of the improved-RL algorithm

1.1 中子照相图像的PSF估计

一般地,中子照相图像的PSF估计分为三个过程:第一步是计算中子照相图像的几何不锐度;第二步是为PSF选择合适的分布模型;第三步是根据几何不锐度和分布模型估计出PSF。

通常情况下,在中子照相系统中,通过中子源出口的中子束穿过被检品某点后,在像探测器处会产生一圆形光斑,如图2所示。其中, E 表示被检品边缘上的点, C 表示被检品的中心点。该圆形光斑被称为几何不锐度,其直径大小一般为^[14]:

$$G = \frac{d}{L/D} \quad (2)$$

式中: L 表示中子源出口到像探测器距离; D 表示中子源出口直径; d 为被检品中心到像探测器的距离。

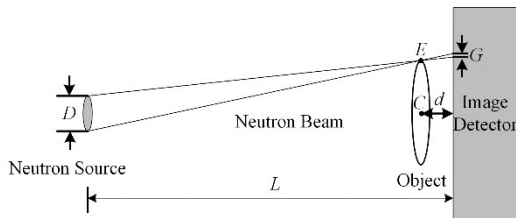


图2 中子照相系统结构示意图

Fig.2 Structural diagram of the neutron imaging system

与X射线衍射场相似,中子源各点处发射的中子束强度分布形状为RC^[15]。同理,所有穿过被检品边缘某一点后的中子束强度分布形状也为RC。将RC的FWHM表示为中子照相图像的几何不锐度 G ^[8]。如图3所示,其中, w 表示RC的FWHM。用于表示PSF的函数模型包括高斯分布^[16]、柯西分布^[12,17]等。本文采用二维柯西分布模型来表示PSF,表达式为:

$$\text{Cauchy}(x,y) = \frac{\xi}{2\pi(\xi^2 + x^2 + y^2)^{3/2}} \quad (3)$$

式中: $\text{Cauchy}(x,y)$ 表示二维柯西分布函数; ξ 表示为分散度参数。几何不锐度 G 与参数 ξ 的关系为:

$$G^2 = 4(2^{2/3} - 1)\xi^2 \quad (4)$$

G 确定后,根据式(4)可得参数 ξ 的值,代入式(3)中可得表示中子照相图像的PSF。

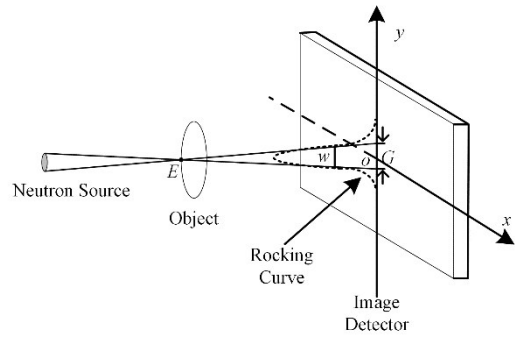


图3 摇摆曲线示意图

Fig.3 Sketch of the rocking curve

1.2 改进的RL算法

RL算法是Richardson和Lucy提出的一种非盲反卷积图像复原方法,算法表达式如式(5)所示:

$$I_{t+1} = I_t \times \frac{I_{\text{degraded}}}{k * I_t} * k^T \quad (5)$$

式中: I_t 表示第 t 次迭代的结果; k 表示PSF; k^T 表示 k 在水平方向的翻转。

由于照相得到的中子照相图像中存在灰度值较高的GSN,若直接采用RL算法进行复原,得到的复原图像会出现严重的振铃效应。因此,建立如下数学模型:

$$I_{\text{degraded}} = \gamma(I * k) + \tilde{\gamma}(I * k) \quad (6)$$

式中: $\gamma(\cdot)$ 为被GSN污染的区域, $\tilde{\gamma}(\cdot)$ 为未被GSN污染的区域,在该数学模型下需要检测出所有的 $\gamma(\cdot)$ 。由于GSN具有孤立性,可采用拉普拉斯算子检测出 $\gamma(\cdot)$,并配合中值滤波去除 $\gamma(\cdot)$ 内的GSN,具体方法如式(7)所示:

$$I_{\text{denoised}}(x,y) = \begin{cases} M[U(x,y)], & \nabla^2 I_{\text{degraded}}(x,y) > T \\ I_{\text{degraded}}(x,y), & \text{other} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $M(\cdot)$ 表示中值滤波; $U(x,y)$ 表示点 (x,y) 的邻域; $\nabla^2 I_{\text{degraded}}(x,y)$ 表示 I_{degraded} 二阶梯度之和; T 为指定阈值。

上述过程只会对含有GSN的区域进行去噪处理,即使在多次使用的情况下,仍然不会损坏图像中的高频信息。因此,将以上步骤引入到RL算法中,以对图像复原过程中的振铃效应进行抑制。改进的RL算法的表达式为:

$$I_{t+1} = I_t \times \left[\frac{M(\gamma(I * k)) + \tilde{\gamma}(I * k)}{k * I_t} * k^T \right] \quad (8)$$

改进的RL算法在中子照相图像反卷积前对GSN进行去除,抑制因GSN产生的振铃效应。

2 实验结果和分析

本文中子照相系统的中子源类型为热中子(能

量区间为0.005~0.5 eV),成像端采用LiF转换屏和电荷耦合元件(Charge Coupled Device, CCD)结合的数字成像方式。其中,该CCD相机为Atik Infinity Camera,分辨率为1 392×1 040。为降低CCD相机的暗电流,将CCD相机放置于密封的真空箱内,温度降至-10℃。另外,在真空箱外包裹一层铅屏蔽层以防止中子束或次级粒子的辐射。本文选取线对样品进行实验^[18-19],线对样品实物如图4所示。线对样品拥有多组粗细不同的线状区域,有利于检测中子照相系统的分辨率。

首先,测量中子照相系统的参数值,得到中子源出口到像探测器距离 L 与中子源出口直径 D 的比值,即 $L/D=80$,被检品中心到像探测器的距离 $d=2$ cm,转换屏大小为20 cm×20 cm。拍照方式设置

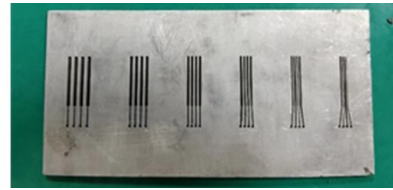


图4 线对样品实物图

Fig.4 Photograph of the line-pair sample

表1 文献[12]方法和改进的RL算法复原图像后的平均梯度和空间频率

Table 1 AGs and SFs of restored images based on the algorithm presented in Ref.[12] and improved-RL algorithm

定量指标 Quantitative index	AG	SF
文献[12]方法 Algorithm in Ref.[12]	2.59	5.92
改进的RL算法 Improved-RL algorithm	4.15	7.69

为单次曝光,曝光300 s后记录并保存图像。由于保

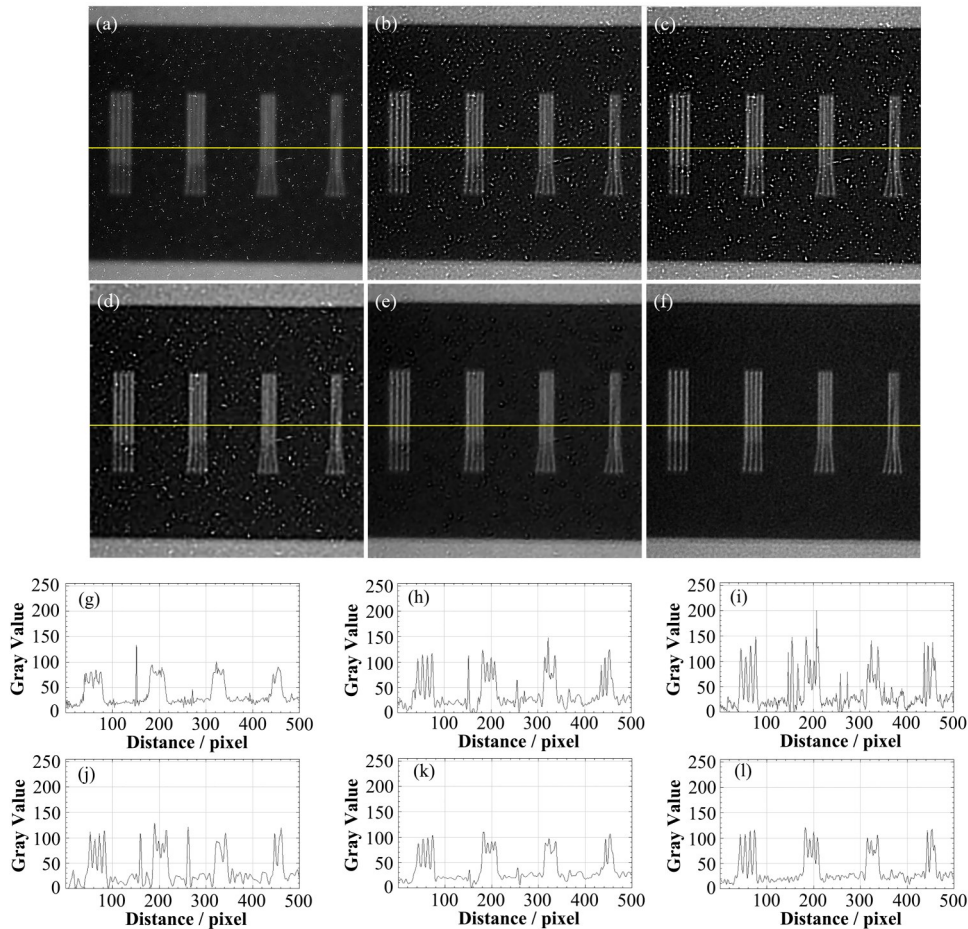


图5 线对样品的中子照相图像、复原结果与对应的行灰度曲线图

(a) 原始中子照相图像, (b) RL算法, (c) 小波降噪RL, (d) 调制核正则化RL, (e) 文献[12]方法, (f) 本文方法, (g) 原始中子照相图像对应行灰度曲线图, (h) RL算法对应行灰度曲线图, (i) 小波降噪RL对应行灰度曲线图, (j) 调制核正则化RL对应行灰度曲线图, (k) 文献[12]方法对应行灰度曲线图, (l) 本文方法对应行灰度曲线图

Fig.5 Neutron photographic image of line-pair sample, restored results and corresponding line grey profile

(a) Original neutron photographic image, (b) RL algorithm, (c) Wavelet-RL, (d) SK-TV-RL, (e) Method in Ref.[12], (f) Our method, (g) Corresponding line grey profile of original neutron photographic image, (h) Corresponding line grey profile of RL algorithm, (i) Corresponding line grey profile of wavelet-RL, (j) Corresponding line grey profile of SK-TV-RL, (k) Corresponding line grey profile of method in Ref.[12], (l) Corresponding line grey profile of our method

存后的图像尺寸较大,且线对样品的特征信息主要集中在图像的中心区域,需要进行裁剪,裁剪后的图像尺寸为 512 pixel×512 pixel;然后根据式(2)计算出中子照相图像的几何不锐度,再根据式(3)、(4)计算出对应的 PSF;最后对线对中子照相图像分别采用 RL 算法、小波降噪 RL 算法、调制核正则化 RL 算法、文献[12]方法和本文改进的 RL 算法进行图像复原,并绘制复原后图像的行灰度曲线,实验结果如图 5 所示。从实验结果可看出,相对于 RL 算法、小波降噪 RL 算法和调制核正则化 RL 算法,经本文改进的 RL 算法处理后,复原后图像噪声的波动幅度明显减小;相对于文献[12]方法,复原后图像行灰度曲线的峰谷值更大、波峰更窄,几何不锐度修正程度有较大的提升。

为客观衡量几何不锐度修正效果,通过无参考图像质量评价指标平均梯度(Average Gradient, AG)和空间频率(Spatial Frequency, SF)对中子照相图像复原质量进行分析,如表 1 所示。其中,AG 可以反映图像中前景信息的纹理变化特征,SF 能够反映图像的整体活跃程度,均可衡量图像的清晰程度。

AG 的定义如下:

$$AG = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \left((D_x^2 I(i,j) + D_y^2 I(i,j)) / 2 \right)^{1/2} \quad (9)$$

式中: M 和 N 分别表示图像的宽度和高度; D 为梯度算子。

SF 的表达式如下:

$$SF = \frac{1}{M \times N} \left(\sum_{i=1}^M \sum_{j=2}^N (I(i,j) - I(i,j-1))^2 + \sum_{i=2}^M \sum_{j=1}^N (I(i,j) - I(i-1,j))^2 \right)^{1/2} \quad (10)$$

一般来说,AG 和 SF 值越大,表明图像的前景纹理层次越多、信息结构越复杂。图 5 中可看出,原始中子照相图像、经 RL 算法、小波降噪 RL 算法和调制核正则化 RL 算法复原后的中子照相图像仍然存在大量的 GSN,而当图像中存在较多的 GSN 时,指标会异常增大,影响 AG 和 SF 对图像前景信息复原效果的判定,因此,只计算文献[12]方法和本文方法复原后图像的 AG 和 SF 指标,如表 1 所示。

从表 1 可以看出,与文献[12]方法相比,经过本文提出的算法复原后,线对中子照相图像 AG 和 SF 值分别提高了 60.23% 和 29.90%,图像锐度有明显的提升。

因此,通过结合图 5 和表 1 的结果可看出,本文中改进的 RL 算法相比于 RL 算法、小波降噪 RL 算法和调制核正则化 RL 算法,能抑制 GSN 在中子照

相图像复原过程中产生的振铃效应,更有利于图像前景细节信息的复原;相比于文献[12]方法,有更好的几何不锐度修正效果。

3 结语

本文提出了一种基于改进 RL 的中子照相图像几何不锐度修正算法对几何不锐度进行修正。通过准确计算表示几何不锐度的 PSF,结合改进的 RL 算法,修正了因几何不锐度引起的图像降质,同时避免了 GSN 对图像复原过程的影响。实验结果表明,本文提出的方法可以获得高质量的复原图像,能够进行高质量的中子照相无损检测,对提升中子照相系统的检测效率与精度意义重大。

作者贡献声明 伍华杰负责图像数据的获取、算法的设计、程序的编写、文章的编写与修订;甘佳负责实验装置的搭建、文章的编写与修订;吕永强提供部分算法思路、文章的修订;汪启宏负责提供部分算法思路;伍一凡负责验证算法的正确性;宋婧负责提供实验装置的指导。

参考文献

- 1 Shinohara T, Kai T, Oikawa K, *et al.* The energy-resolved neutron imaging system, RADEN[J]. Review of Scientific Instruments, 2020, **91**(4): 043302. DOI: [10.1063/1.5136034](https://doi.org/10.1063/1.5136034).
- 2 Defraeye T, Derome D, Aregawi W, *et al.* Quantitative neutron imaging of water distribution, venation network and sap flow in leaves[J]. Planta, 2014, **240**(2): 423 - 436. DOI: [10.1007/s00425-014-2093-3](https://doi.org/10.1007/s00425-014-2093-3).
- 3 Gibbons M R, Richards W J, Shields K. Optimization of neutron tomography for rapid hydrogen concentration inspection of metal castings[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 1999, **424**(1): 53 - 57. DOI: [10.1016/S0168-9002\(98\)01297-2](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(98)01297-2).
- 4 Lerche M, Tremsin A S, Schillinger B. Bright flash neutron radiography at the McClellan nuclear research reactor[J]. Physics Procedia, 2015, **69**: 299 - 303. DOI: [10.1016/j.phpro.2015.07.042](https://doi.org/10.1016/j.phpro.2015.07.042).
- 5 Butler L G, Lehmann E H, Schillinger B. Neutron radiography, tomography, and diffraction of commercial lithium-ion polymer batteries[J]. Physics Procedia, 2013, **43**: 331 - 336. DOI: [10.1016/j.phpro.2013.03.039](https://doi.org/10.1016/j.phpro.2013.03.039).
- 6 Sun F, Markotter H, Manke I, *et al.* Complementary X-ray and neutron radiography study of the initial lithiation process in lithium-ion batteries containing silicon

- electrodes[J]. *Applied Surface Science*, 2017, **399**: 359 - 366. DOI: [10.1016/j.apsusc.2016.12.093](https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.12.093).
- 7 赵亮, 李中星, 岳松, 等. 中子受激辐射计算机断层扫描成像系统的MCNP模拟[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2017, **47**(6): 43 - 50. DOI: [10.1360/SSPMA2016-00395](https://doi.org/10.1360/SSPMA2016-00395).
- ZHAO Liang, LI Zhongxing, YUE Song, *et al.* MCNP simulation study of neutron stimulated emission computed tomography system based on D-T neutron source[J]. *Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica)*, 2017, **47**(6): 43 - 50. DOI: [10.1360/SSPMA2016-00395](https://doi.org/10.1360/SSPMA2016-00395).
- 8 金炜, 魏彪. 中子数字图像几何不锐度校正算法研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(10): 1765 - 1770. DOI: [10.3321/j.issn:0253-2239.2007.10.008](https://doi.org/10.3321/j.issn:0253-2239.2007.10.008).
- JIN Wei, WEI Biao. Correction algorithm for the geometric unsharpness of digital neutron radiation image[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(10): 1765 - 1770. DOI: [10.3321/j.issn:0253-2239.2007.10.008](https://doi.org/10.3321/j.issn:0253-2239.2007.10.008).
- 9 Souza E S, Almeida G L, Lopes R T. A novel methodology to determine the divergence of a neutron beam[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2016, **838**: 129 - 136. DOI: [10.1016/j.nima.2016.09.020](https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.09.020).
- 10 Souza E S, Silvani M I, Almeida G L, *et al.* Determination of a neutron beam divergence after the rocking curve concept using Richardson - Lucy's unfolding algorithm[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2018, **908**: 172 - 181. DOI: [10.1016/j.nima.2018.08.055](https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.08.055).
- 11 乔双, 王巧, 孙佳宁. 基于调制核回归和正则化Richardson - Lucy算法的中子图像复原方法[J]. *原子能科学技术*, 2015, **49**(4): 765 - 768. DOI: [10.7538/yzk.2015.49.04.0765](https://doi.org/10.7538/yzk.2015.49.04.0765).
- QIAO Shuang, WANG Qiao, SUN Jianing. Neutron imaging restoration method based on steering-kernel regression and regularized Richardson - Lucy algorithm[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2015, **49**(4): 765 - 768. DOI: [10.7538/yzk.2015.49.04.0765](https://doi.org/10.7538/yzk.2015.49.04.0765).
- 12 Yazid K, Abdullah M Z. Point spread function estimation for neutron images[C]//2nd International Conference on Electronics and Electrical Engineering Technology (EEET)/3rd International Conference on Biomedical Engineering and Bioinformatics (ICBEB). Malaysia, 2019. DOI: [10.1145/3362752.3362765](https://doi.org/10.1145/3362752.3362765).
- 13 范冲, 李冠达, 伍超云, 等. 点扩散函数的改进倾斜刃边重建的高精度估计[J]. *测绘学报*, 2015, **44**(11): 1219 - 1226. DOI: [10.11947/j.AGCS.2015.20140400](https://doi.org/10.11947/j.AGCS.2015.20140400).
- FAN Chong, LI Guanda, WU Chaoyun, *et al.* High accurate estimation of point spread function based on improved reconstruction of slant edge[J]. *Acta Geodastica et Cartographica Sinica*, 2015, **44**(11): 1219 - 1226, 1254. DOI: [10.11947/j.AGCS.2015.20140400](https://doi.org/10.11947/j.AGCS.2015.20140400).
- 14 貂大卫, 刘以思, 金光宇, 等. 中子照相[M]. 北京: 原子能出版社, 1996.
- MO Dawei, LIU Yisi, JIN Guangyu, *et al.* Neutron photography[M]. Beijing: Atomic Press, 1996.
- 15 邵军明, 路宏年, 蔡慧. X射线成像的一种点扩展函数模型[J]. *光学学报*, 2005, **25**(8): 1148 - 1152. DOI: [10.3321/j.issn:0253-2239.2005.08.028](https://doi.org/10.3321/j.issn:0253-2239.2005.08.028).
- SHAO Junming, LU Hongnian, CAI Hui. A point spread function model for X-ray imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(8): 1148 - 1152. DOI: [10.3321/j.issn:0253-2239.2005.08.028](https://doi.org/10.3321/j.issn:0253-2239.2005.08.028).
- 16 吴俊芳, 刘桂雄, 韦宁. 散焦含噪图像的点扩散函数估计与边缘检测[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2010, **38**(6): 118 - 121, 133. DOI: [10.3969/j.issn.1000-565X.2010.06.022](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-565X.2010.06.022).
- WU Junfang, LIU Guixiong, WEI Ning. PSF estimation and edge detection of defocused noisy image[J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2010, **38**(6): 118 - 121, 133. DOI: [10.3969/j.issn.1000-565X.2010.06.022](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-565X.2010.06.022).
- 17 明英, 蒋晶珏. 使用柯西分布点扩散函数模型的单幅散焦图像深度恢复[J]. *中国图象图形学报*, 2015, **20**(5): 708 - 714. DOI: [10.11834/jig.20150513](https://doi.org/10.11834/jig.20150513).
- MING Ying, JIANG Jingjue. Depth recovery from a single defocused image using a Cauchy-distribution-based point spread function model[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2015, **20**(5): 708 - 714. DOI: [10.11834/jig.20150513](https://doi.org/10.11834/jig.20150513).
- 18 曹旭宁, 陈思泽, 俞杰, 等. 基于粒子群优化的自适应对比度增强算法在中子照相中的应用[J]. *核技术*, 2021, **44**(7): 070504. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.070504](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.070504).
- CAO Xuning, CHEN Sizhe, YU Jie, *et al.* Application of adaptive contrast enhancement algorithm based on particle swarm optimization in neutron radiography[J]. *Nuclear Techniques*, 2021, **44**(7): 070501. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.070504](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.070504).
- 19 Zhang L X, Chen S Z, Zhang Z D, *et al.* Resolution analysis of thermal neutron radiography based on accelerator-driven compact neutron source[J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2023, **34**(5): 76. DOI: [10.1007/s41365-023-01227-x](https://doi.org/10.1007/s41365-023-01227-x).