

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1904883

# 基于投影图像特征匹配的微纳 CT 焦点漂移校正<sup>\*</sup>

蔡玉芳<sup>1,2</sup>, 贾琳琳<sup>1,2</sup>, 王 珩<sup>1,2</sup>, 葛敏雪<sup>1,2</sup>

(1. 重庆大学光电工程学院 重庆 400044; 2. 重庆大学 光电技术及系统教育部重点实验室 ICT 研究中心 重庆 400044)

**摘要:**微纳 CT 射线源焦点热漂移是影响图像清晰度的重要因素之一。通过理论和仿真实验分析了射线源焦点漂移对图像清晰度的影响。利用实际微纳 CT 系统,实验发现焦点漂移主要是缓慢热漂移,漂移量与 X 射线源功率正相关,且焦点漂移具有一定随机性。据此,提出一种基于投影图像特征匹配的焦点漂移校正方法。首先,在实际 CT 扫描后快速采集少量参考投影,根据实际 CT 投影和参考投影自适应特征匹配结果求取特定角度下的焦点漂移量;其次,采用样条插值获取 CT 扫描过程所有的焦点漂移量;最后,根据焦点漂移量修正实际投影数据,重建得到校正后的图像。实验表明,该方法定位精度高,可大幅度减少图像畸变,图像清晰度提高近 10%。

**关键词:**微纳 CT; 焦点漂移; 特征匹配; 漂移校正; 图像清晰度

中图分类号: TP391. 4 TH74 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510. 40

## Focus drift correction for micro-nano CT based on projection image feature matching

Cai Yufang<sup>1,2</sup>, Jia Linlin<sup>1,2</sup>, Wang Jue<sup>1,2</sup>, Ge Minxue<sup>1,2</sup>

(1. College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. ICT Research Center, Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Systems, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** The focus thermal drift of micro-nano CT ray source is one of the important factors affecting image sharpness. The influence of focus drift of the ray source on image sharpness is analyzed through theoretical and simulation experiments. With the actual micro-nano CT system, experiment discovers that the focus drift is mainly slow thermal drift and the drift is positively correlated with the power of the X-ray source, meanwhile the focus drift has certain randomness. On this basis, a focus drift correction method is proposed based on projection image feature matching. Firstly, a small amount of reference projection is rapidly acquired after the actual CT scanning, and the focus drift amount at specific angle is obtained according to result of adaptive feature matching between the actual projection and reference projection. Secondly, all the focus drift amounts in the CT scanning process are obtained with spline interpolation. Finally, the actual projection data are corrected according to the amount of focus drift, and through reconstruction the corrected image is obtained. Experiments show that the proposed method has high positioning accuracy, greatly reduces image distortion and improves image sharpness by nearly 10%.

**Keywords:** micro-nano computed tomography (CT); focus drift; feature matching; drift correction; image sharpness

## 0 引言

计算机层析成像技术(computed tomography, CT)作为一种先进的无损检测技术,具有成像直观、无损伤、分辨率高等优点,已广泛应用于工业和医学等领域<sup>[1-3]</sup>。近

年来,随着 X 射线源和探测器技术水平的提升,高分辨锥束微纳 CT 得到迅速发展<sup>[4-6]</sup>。与常规 CT 相比,微纳 CT 具有焦点小、分辨率高、测量精度高等特点,通常用于对物体内部结构微纳尺度分析,与电子显微镜一样,它是探究微观世界的重要技术手段<sup>[7]</sup>。微纳 CT 分辨率需求为亚微米级,而焦点的微米级漂移可导致微纳细节的模糊,

因此,其焦点漂移的校正显得尤为重要。在 CT 成像过程中,通常采用增加 X 射线源管电压、靶电流或曝光时间的方式来提高信噪比,而射线源功率的提高和扫描时间的加长也意味着增加了系统的不稳定性和不准确性<sup>[8-9]</sup>。就微纳 CT 而言,探测器、转台的运动以及焦点漂移均会引起图像模糊,但是,探测器和转台的运动相对于焦点漂移可忽略不计。研究表明,X 射线源中仅有少数能量转化为 X 射线,其余的能量都转换成了热能<sup>[10]</sup>。基于此,X 射线源焦点(以下简称焦点)位置会因为电磁场的影响、电子束的漂移和 X 射线源靶的热变型而发生漂移<sup>[11-12]</sup>,从而引起探测器接收的投影位置出现偏差,最终导致重建图像清晰度严重下降。普通 CT 的焦点大小为 0.4~2 mm,而微纳 CT 焦点大小为微米级甚至亚微米级<sup>[13]</sup>,焦点的微小漂移都会对图像质量产生较大影响。虽然,射线源冷却系统可以一定程度减少焦点漂移的影响,但其微弱的制冷效果带来高昂的工艺和时间成本。实际检测中,通常采用 X 射线开源稳定一段时间后再启动 CT 扫描的方式,以避免 X 射线刚开源短时间内焦点较大的漂移,该方法极大增加射线源的损耗。因此,有必要采取高效率、低成本、有效的方法对微纳 CT 焦点漂移进行校正。焦点漂移分为瞬态漂移和缓慢漂移,瞬态漂移是指开源瞬间偏移,缓慢漂移则贯穿在 CT 整个扫描过程,其标定和校正难度大,本文将围绕动态漂移开展研究。

目前,为满足微纳尺度高分辨率需求,X 射线源生产厂家和大量学者就焦点漂移问题开展了深入探讨,主要校正方法分为 3 类:1)基准模型标定法。该类方法将微小模型作为投影图像中的基准模型,通过跟踪基准模型投影位置的变化来求解焦点漂移量。Gullberg 等<sup>[14]</sup>和 Bronikov<sup>[15]</sup>分别在 1990 年和 1999 年提出的点状物体和开口模型是此类方法的典型代表。近年来,多位学者提出了将诸如小钢球<sup>[16]</sup>、氮化硅精密球<sup>[17]</sup>、小锡球<sup>[18]</sup>等基准模型固定在焦点旁,根据模型的投影位置来求解焦点漂移量的方法,此类方法实时性好,定位精度高;不足之处是,模型的制作和安装困难,同时模型安装位置影响检测对象尺寸。2)投影补偿法。其通过采集辅助投影数据来实现焦点漂移校正<sup>[19-20]</sup>。该类方法不需要特定模型,操作简单,易于实现。本文方法属于该类方法的一种改进。2008 年,Sasov 等<sup>[19]</sup>提出一种参考投影补偿法,通过对比实际投影数据与参考投影数据计算焦点在 X、Y 方向上的漂移量。3)迭代法。该类方法既不需要在测量区域设置基准模型,也不需要额外的参考投影<sup>[19-21]</sup>,而是直接利用投影图像进行迭代校正,该类方法耗时且校正效果不理想。

本文实验分析了焦点漂移对图像清晰度的影响以及射线源功率对焦点漂移的影响;针对微纳 CT 扫描过程中

焦点的缓慢漂移问题,提出了一种基于自适应投影图像特征区域匹配的参考投影补偿法。该方法不需要基准模型,操作简单,焦点漂移量的求解结果准确,处理速度快,校正效果好,显著提高了图像清晰度。

## 1 焦点漂移对重建图像质量的影响

射线源焦点漂移的物理过程如图 1 所示,在 CT 扫描过程中,射线源靶材料会由于温度的升高而发生热变形,使得实际焦点位置发生偏移,而图像重建则是假设焦点始终处于理想位置,因此焦点漂移会导致重建图像的模糊。当焦点位置向上漂移时,射线在探测器上的投影位置则向下漂移。两者满足如下关系:

$$\Delta s = \frac{R}{D - R} \quad (1)$$

$$\Delta s = \frac{\Delta p}{M - 1} \quad (2)$$

式中:  $M = \frac{D}{R}$ ,  $M \geq 1$ , 表示图像几何放大倍数;  $R$  为焦点到 CT 系统转台中心的距离;  $D$  为焦点到探测器平面距离。由式(2)可知,焦点漂移量  $\Delta s$  与投影位置偏移量  $\Delta p$  成正比,经过几何放大,焦点微小漂移则对应探测器投影位置的较大偏差。然而,为了获得微纳尺度的分辨率,通常需要较大的几何放大倍数,因此,为满足高分辨检测需求,需要采取有效措施校正焦点漂移。

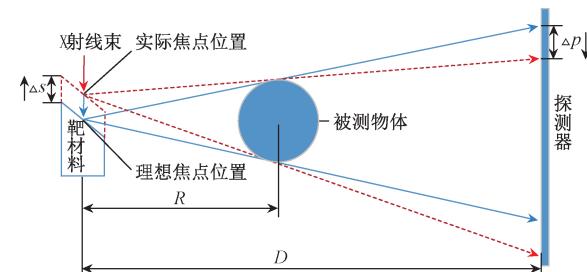


图 1 焦点位置对投影图像的影响

Fig.1 The influence of focus position on projection image

为进一步探究焦点漂移对重建图像质量的影响,本文选用图 2 所示的球阵列模型进行仿真实验。模型大小为(256×256×256)像素,模型中每个球半径相等且为 20 像素,球体按等间隔排列。仿真实验参数如表 1 所示。实验中,假设焦点在扫描过程中 X 和 Y 方向的漂移量均是在投影角度为 0°~150° 缓慢递增,而投影角度为 150°~360° 时则保持不变,且 X 和 Y 方向的最大漂移量分别为 6 像素和 4.5 像素,仿真获取模型在 360° 的投影数据,对投影数据进行重建,得到图像如图 3 所示。

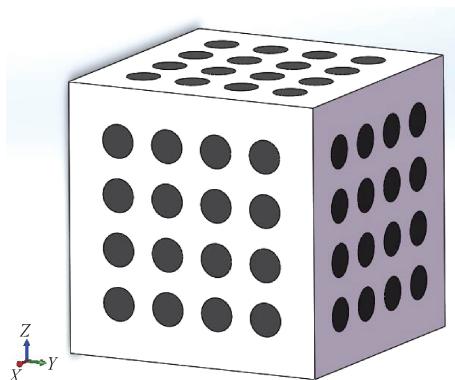


图 2 仿真球阵列模型

Fig.2 Phantom of simulation sphere array

表 1 仿真实验参数

Table 1 Simulation experiment parameters

实验参数	R/pixels	D/pixels	锥角/(°)	探测器大小/pixels	重建图像大小/pixels
数值	1 224	2 448	12	512×512	256×256×256

将理想 CT 切片与存在焦点漂移的 CT 切片进行比较, 可看出焦点漂移对重建图像质量的影响。选取 YZ 平面第 101 层进行比较, 从图 3 仿真实验结果可以明显看出, 焦点漂移导致 CT 切片图像边缘产生畸变和模糊。因此, 焦点漂移的校准对提高微纳 CT 成像清晰度和分辨率具有实际应用价值。

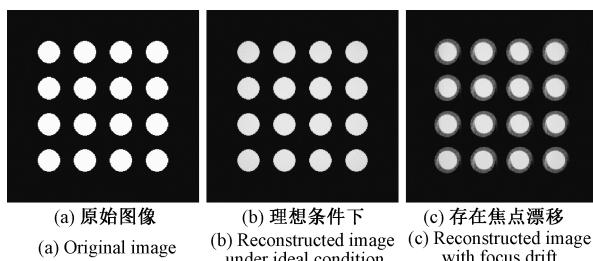


图 3 焦点漂移对重建图像的影响

Fig.3 The influence of focus drift on reconstructed image

## 2 微纳 CT 系统焦点漂移影响因素分析

研究表明, 射线源温度变化是导致焦点漂移的关键因素, 而温度变化则主要取决于射线源功率。本文采用线框模型<sup>[22]</sup>分析射线源功率对焦点漂移的影响, 如图 4 所示, 线框模型结构简单, 其投影清晰且边缘易于提取, 因而能够准确计算焦点漂移量<sup>[23]</sup>。在求取焦点漂移量时, 首先利用 Zernike 算法提取线框投影边缘, 然后拟合得出 X、Y 方向的直线方程, 进而得到两直线的交点坐标, 以此坐标作为特征点, 由特征点的偏移来反推焦点漂移量。

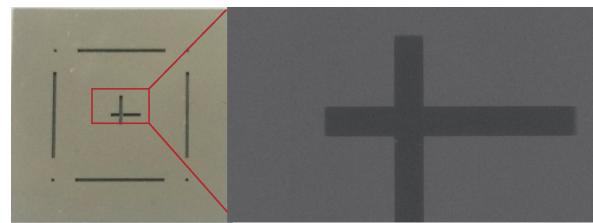
(a) 线框模型  
(a) Line frame model  
(b) 线框模型投影图像  
(b) Projection image of the line frame model

图 4 线框模型及其投影图像

Fig.4 Line frame model and its projection image

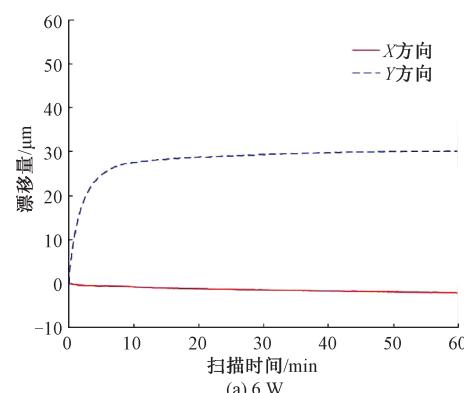
以第 1 幅投影图像中模型的特征点作为参考位置, 记为  $p_1$ , 则第  $i$  幅投影图像特征点为  $p_i$ , 其与第 1 幅投影图像特征点坐标偏差为  $\Delta p_i = p_i - p_1$ , 然后由式(2)和几何放大倍数求出焦点漂移量<sup>[22-23]</sup>。

在分析射线源功率对焦点漂移的影响实验中, 保持其他实验条件不变, 电流设为 150  $\mu\text{A}$ , 射线源的电压分别设为 100、80、60、40 kV, 对应的射线源功率分别为 15、12、9、6 W。微纳 CT 系统参数如表 2 所示, 实验结果如图 5 所示。

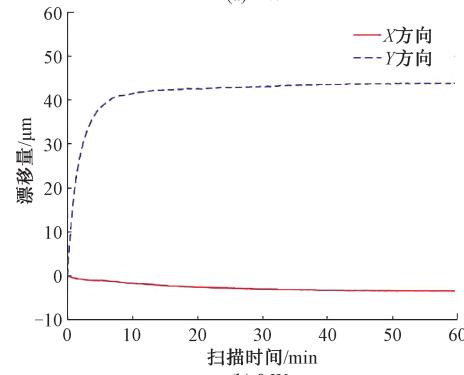
表 2 功率实验系统参数

Table 2 The parameters of the power experiment system

实验参数	射线源焦点尺寸/ $\mu\text{m}$	探测器单元尺寸/mm	R/mm	D/mm	放大倍数M
数值	5	0.127	16.72	571.78	34.2



(a) 6 W



(b) 9 W

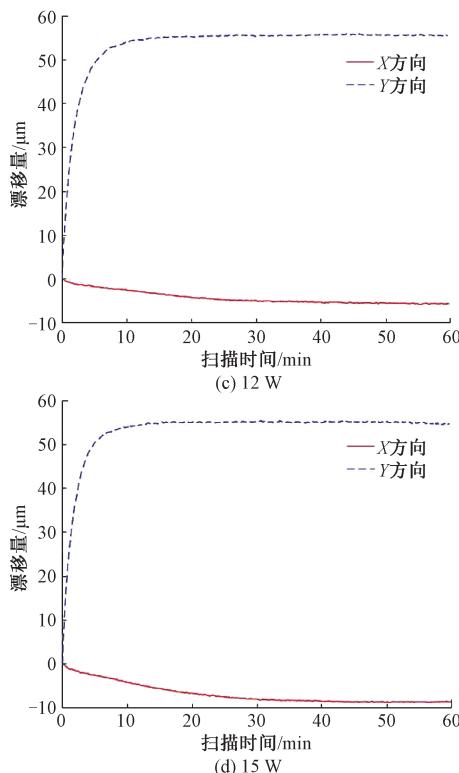


图 5 射线源不同功率焦点漂移量分布

Fig.5 Focus drift profiles for the ray sources with different powers

从图 5 实验结果可以看出,当射线源电压逐渐增大,即功率逐渐增大时,X 和 Y 方向的焦点漂移量均增大。功率越大,X 射线源发热越严重,系统越不稳定,因此焦点热漂移也就越明显。

同时,重复功率实验发现,即使功率相同,焦点漂移曲线趋势一致,但交叉点坐标不尽相同,表明射线源的焦点位置具有一定随机性,因此需要采取实时有效的校准方法。图 6 所示为 4 种不同功率下 X、Y 方向焦点位置的分布。由图 6 同样得出,随着功率增加,X、Y 方向的焦点漂移量均不同程度增加,约在 15~30 min 后趋于稳定。

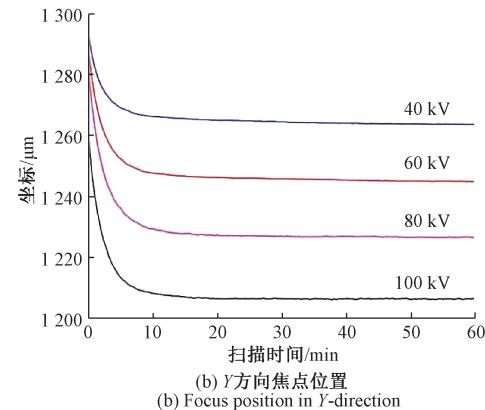
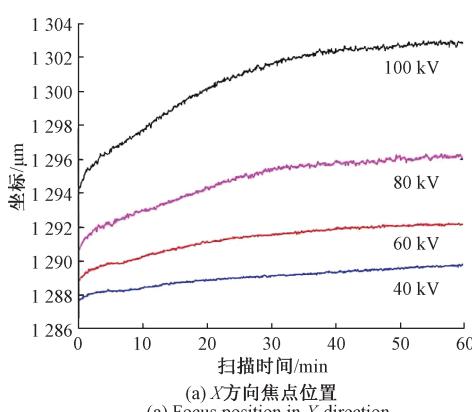


图 6 不同功率焦点位置分布

Fig.6 Focus position distribution for different powers

### 3 焦点漂移的校正

根据上述仿真和实验分析,针对焦点的缓慢漂移造成的图像模糊与畸变,应采用一种基于自适应投影图像特征匹配的方法来校正焦点漂移,该方法假定射线源开源稳定较长时间后,短时间内快速扫描时焦点漂移较小可忽略不计。该结论在上述的功率实验中已经得到验证。基本思路是以快速扫描投影数据作为参考投影<sup>[19]</sup>,与实际投影数据进行自适应投影图像特征区域匹配得到焦点漂移量,再将其反馈至实际投影中进行修正。本文提出的焦点漂移校正方法具体实现步骤描述如下。

1) 利用微纳 CT 系统扫描被测物体,获得一组实际 CT 投影数据;

2) 在不关电源情况下,保持其他扫描参数不变,立即进行一次少量视角、短时间的 CT 扫描,获得一组参考投影数据<sup>[14]</sup>;

3) 比较对应视角下的实际投影图像与参考投影图像<sup>[14]</sup>,并通过自适应特征区域匹配,获得相应视角下的焦点漂移量,本文利用特征区域的质心进行匹配。相比基于灰度区域和频域的匹配方法,基于自适应特征区域质心匹配法求解的焦点漂移量更准确、速度更快;

4) 采用 3 次样条插值计算其余视角下的焦点漂移量,由此获得所有视角下实际投影数据的焦点漂移量。三次样条插值是一种较少投影视角下、获得较精确焦点漂移量的最佳插值方法。

5) 利用所求得的焦点漂移量修正实际投影图像,并进行图像重建,最终获得被测物体清晰的 CT 三维图像。

步骤 3) 中自适应特征区域质心匹配方法的示意图如图 7 所示(以竹纤维投影为例),具体实现过程:首先,采用迭代方式以自适应阈值分割得到投影图像的特征区域,从而克服传统阈值分割仅依据均值和标准差的不

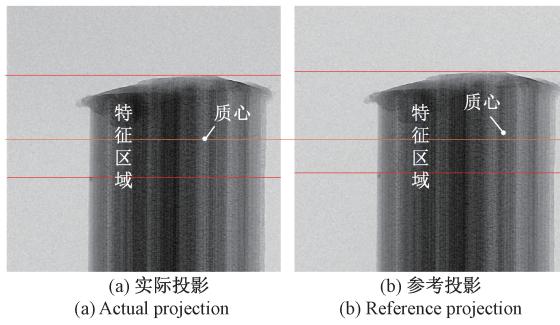


图 7 特征区域质心匹配示意图

Fig.7 Schematic diagram of feature area centroid matching

足<sup>[24]</sup>;然后,利用特征区域的质心进行匹配,求解出投影的偏移量;最后,根据式(2)求解焦点偏移量。由于投影图像不一定涵盖被测物体的所有轮廓,如果求取整个投影图像的质心,则在焦点发生漂移的情况下,物体的投影位置和投影大小均会发生变化,全局投影图像质心就不能作为求解焦点漂移的特征点,因此必须提取投影图像的局部特征区域。另外,本文采用的迭代法可以自适应获取分割阈值,适用于各种投影图像。该迭代法本质是

基于最优化逼近的思想,实现过程:(1)选择一个近似的初始阈值  $T_0$ ,设图像的最大灰度值和最小灰度值分别  $I_{\max}$  和  $I_{\min}$ ,则令  $T_0 = (I_{\max} + I_{\min})/2$ ;(2)根据阈值  $T_0$  将图像分为前景和背景,并求出两部分的平均灰度  $I_a$  和  $I_b$ ,根据  $I_a$  和  $I_b$  选择新的阈值  $T = (I_a + I_b)/2$ ;(3)重复步骤(2),直至  $T$  不再变化,即得到最终的阈值  $T$ 。

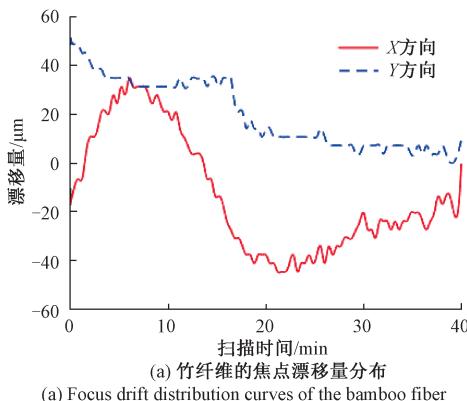
为验证本文方法的有效性,本文用两个样本进行实验检验,分别选取典型微结构材料样本竹纤维和党参。实验中采用国家重大科学仪器专项开发的微纳 CT 系统<sup>[23]</sup>,系统空间分辨率为 5  $\mu\text{m}$ 。首先,对样本进行 1 000 个视角的扫描,然后,在不改变扫描条件且不关闭射线源的情况下,进行 100 个视角的快速扫描得到参考投影<sup>[23]</sup>,而后采用自适应特征区域匹配法求取对应视角下的图像像素偏移量,再根据式(2)、图像几何放大倍数和探测器单元尺寸求出对应的焦点微米级漂移量,并插值计算其他视角下的焦点漂移量,最后,用求得的图像漂移量补偿实际投影数据,得到重建后的图像。同时,将本文方法与基于频域相位匹配的参考投影补偿法<sup>[23]</sup>的校正效果进行了对比。表 3 所示为两组样本的实际实验参数。

表 3 实际实验 CT 系统参数

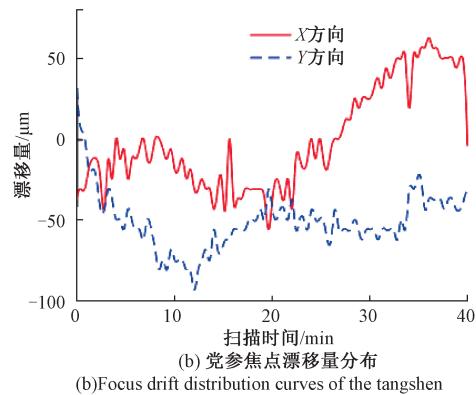
Table 3 Actual experiment CT system parameters

实验参数	射线源焦点大小/ $\mu\text{m}$	探测器单兀尺寸/ $\mu\text{m}$	$R/\text{mm}$	$D/\text{mm}$	放大倍数 $M$	电压/kV	电流/ $\mu\text{A}$	曝光时间/ms	采集帧数	像元大小/ $\mu\text{m}$
竹纤维	5	127	15	568.200	37.9	80	100	100	5	3
党参	5	127	30	670.200	22.3	80	100	133	3	5

图 8 所示为两组样本的焦点漂移量求解结果,对比两组曲线可以看出,焦点漂移趋势具有一定的重复性;在不同实验条件下,焦点漂移量会有差异;且由于工件旋转的原因,X 方向的漂移量均呈现出一定的正弦特性。图 8(a) 中竹纤维的漂移量分布显示,X 和 Y 方向的最大焦点漂移量分别为 41(负方向) 和 50(正方向)  $\mu\text{m}$ 。图 8(b) 中党参 X 和 Y 方向的最大漂移量分别为 70(正方向) 和 85(负方向)  $\mu\text{m}$ 。



(a) 竹纤维的焦点漂移量分布



(b) Focus drift distribution curves of the tangshen

图 8 两组样本的焦点漂移量求解结果

Fig.8 Focus drift result curves of two samples

图 9 和 10 所示分别为竹纤维校正前后的重建结果。分别截取了竹纤维的横向切片和纵向切片来对校正效果,从未校正的切片中可以看到,焦点漂移导致图像整体较模糊,内部结构完全不能分辨,而经基于频域相位匹配

的参考投影补偿法校正后图像质量有所改善,但整体结构还是比较模糊,且内部的孔状结构特别是箭头所指处

仍存在畸变,而经本文方法校正后的竹纤维切片结构清晰,图像清晰度显著提高。

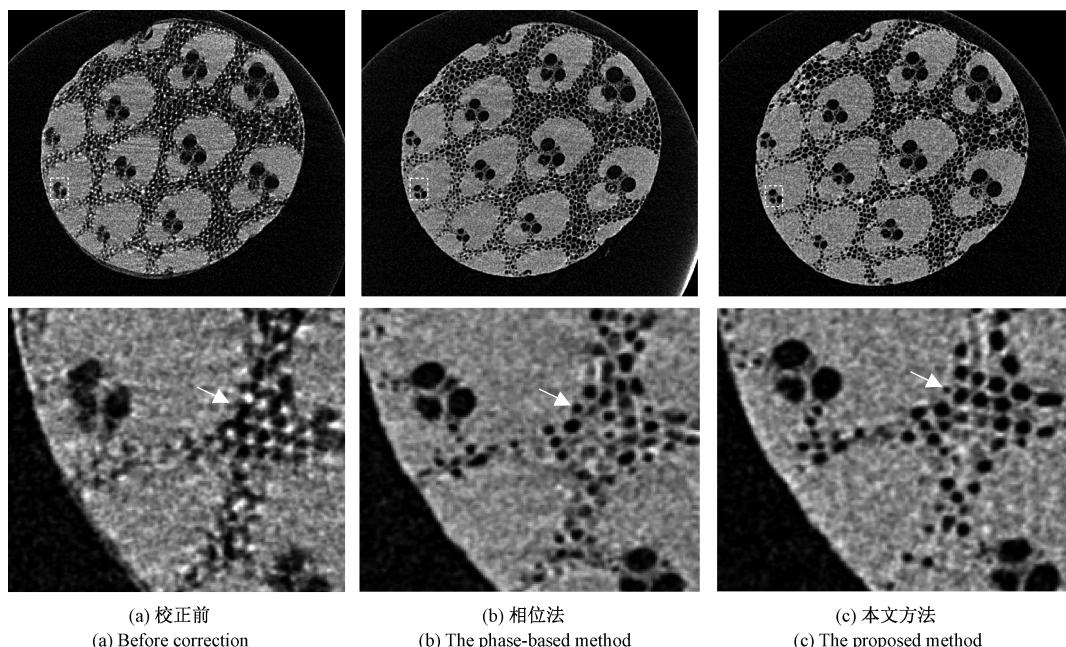


图 9 竹纤维横向第 500 层切片校正结果及其局部放大图

Fig.9 The 500<sup>th</sup> lateral slice correction results of the bamboo fiber and their partial enlargements

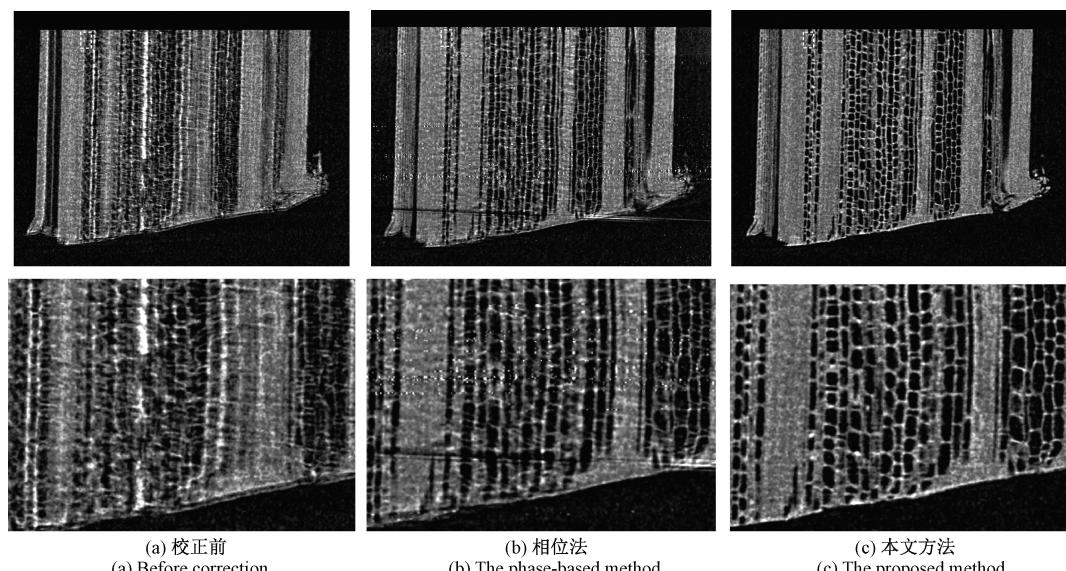


图 10 竹纤维纵向第 268 层切片校正结果及其局部放大图

Fig.10 The 268<sup>th</sup> longitudinal slice correction results of the bamboo fiber and their partial enlargements

图 11 和 12 所示分别为党参校正前后横向和纵向切片对比。同样可以看出,校正前图像感兴趣区域(如箭头所指方向)特别是内部的孔状结构和边缘都比较模糊,边缘重影明显,内部结构由于漂移而发生畸变和错位。相位法校正后图像清晰度有所提高,而采用本文方法校正后党参图像轮廓和内部结构均更为清晰,校正效果优于

相位法。

进一步,采用图像局部细节(如各切片图中的虚线框所标识区域)的平均梯度定量分析图像清晰度<sup>[25]</sup>,如表 4 所示。由表 4 可看出,经相位法和本文方法校正后,竹纤维和党参 CT 切片图像清晰度都有所提高,而本文方法焦点漂移定位精度更高,图像清晰度提高了近 10%。

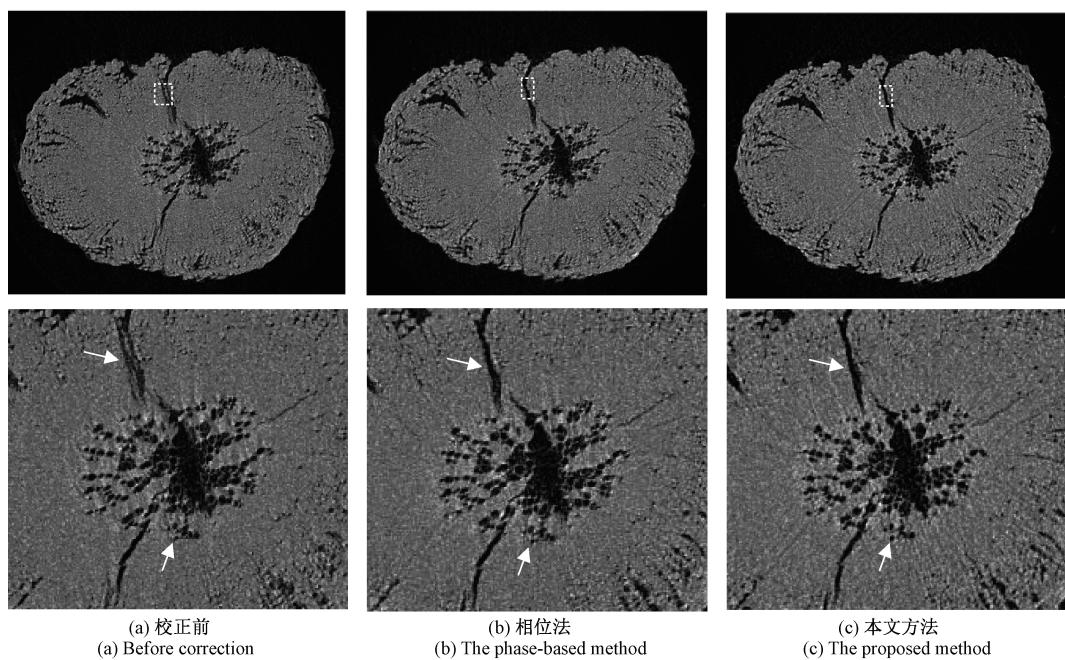


图 11 党参横向第 50 层切片校正结果及其局部放大图

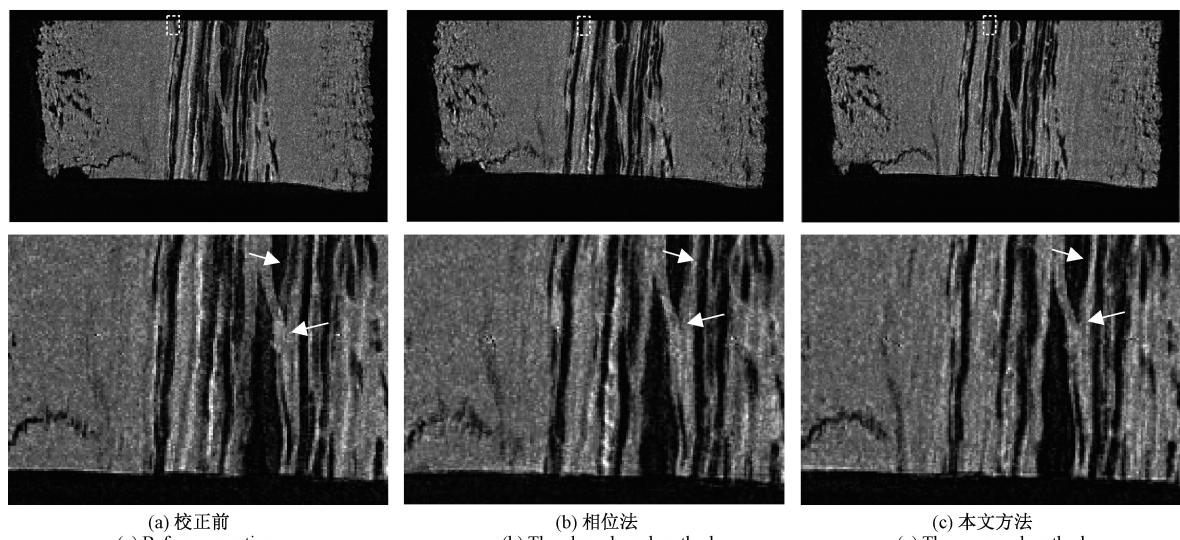
Fig.11 The 50<sup>th</sup> lateral slice correction results of the tangshen and their partial enlargements

图 12 党参纵向第 120 层切片校正结果及其局部放大图

Fig.12 The 120<sup>th</sup> longitudinal slice correction results of the tangshen and their partial enlargements

表 4 图像清晰度对比

Table 4 Comparison of the image sharpness

检测对象	竹纤维		党参	
	横向	纵向	横向	纵向
校正前	144.236	156.109	147.897	97.044
相位法	145.073	163.129	148.691	99.885
本文方法	153.088	165.329	153.219	105.154
相位法提高比率/%	0.5	4.5	0.5	2.9
本文方法提高比率/%	6.1	5.9	3.6	8.4

综上,基于自适应投影图像特征区域质心匹配的参考投影补偿法可对因焦点漂移产生的图像畸变和模糊进行有效校正,校正效果优于基于频域相位匹配的参考投影补偿法,可用于解决实际工程问题;相比基准模型法,本文方法不需要微纳尺度、高安装难度的模型,仅采用参考投影特征匹配方法就可实现焦点漂移的校准,工程实用性更好。

## 4 结 论

本文分析了影响焦点漂移的主要因素,实验结果表明,X射线源功率对焦点漂移影响较大,且焦点漂移量与出束功率正相关。综合3种主流校正方法的优劣,本文提出了一种基于自适应投影图像特征区域质心匹配的方法来校正焦点的缓慢漂移,减少了图像畸变,提升了图像清晰度,实验证明了该方法的有效性。同时,本文方法不需要基准模型,操作简单,易于实现,既可节省扫描时间和减少设备损耗,又大幅提升微纳CT图像质量,满足物体内部微观结构检测需求,实际应用价值高。本文方法适用于被测物体投影特征易于提取的情况,后续研究工作将探讨更为普适、便捷、准确的校正方法。

## 参考文献

- [ 1 ] 曾理,李宗剑,刘长江. 基于 Wedgelet 的 CT 体数据线特征提取 [J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(3):606-611.
- ZENG L, LI Z J, LIU CH J. Feature extraction of CT body data line based on wedgelet [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(3): 606-611.
- [ 2 ] WANG ZH L, ZHU P P, HUANG W X, et al. Analysis of polychromaticity effects in X-ray talbot interferometer [J]. Anal Bioanal Chem, 2010, 397(6): 2137-2141
- [ 3 ] ZHANG K, LI D E, ZHU P P, et al. 3D visualization of the microstructure of quedius beesoni cameron using micro-CT [J]. Analytical & Bioanalytical Chemistry, 2010, 397(6):2143-2148.
- [ 4 ] YIN G C, TANG M T, SONG Y F, et al. Energy-tunable transmission X-ray microscope for differential contrast imaging with near 60 nm resolution tomography [J]. Applied Physics Letters, 2006, 88(24):85-165.
- [ 5 ] WAGNER R, VAN L D, HOSSLER F, et al. High-resolution imaging of kidney vascular corrosion casts with Nano-CT [J]. Microscopy and Microanalysis, 2011, 17(2):215-219.
- [ 6 ] ALT V, DANIELA V K, LIPS K S, et al. Assessment of angiogenesis in osseointegration of a silica-collagen biomaterial using 3D-nano-CT [J]. Acta Biomaterialia, 2011, 7(10):3773-3779.
- [ 7 ] 李光,罗守华,顾宁.Nano CT 研究进展 [J].科学通报, 2013, 58(7):501-509.
- LI G, LUO SH H, GU N. Research progress of Nano CT imaging [J]. Science China Press, 2013, 58 ( 7 ): 501-509.
- [ 8 ] KINGSTON A, SAKELLARIOU A, VARSLOT T, et al. Reliable automatic alignment of tomographic projection data by passive auto-focus [J]. Medical Physics, 2011, 38(9):4934.
- [ 9 ] 傅健, 刘振中. X 射线显微镜纳米 CT 旋转中心随机偏移的校正 [C]. 光学精密工程论坛, 2015:645-651.
- FU J, LIU ZH ZH. Correction of random offset of nano-CT rotation center in X-ray microscope [C]. Optical Precision Engineering Forum, 2015:645-651.
- [ 10 ] SUZUKI A, WATANABE F, UEKI H, et al. Calibration system for focal spot shift in an X-ray CT device, US8761483[P]. 2014-06-24.
- [ 11 ] VOGELER F, VERHEECKE W, VOET A, et al. Positional Stability of 2D X-ray Images for Computer Computed Tomography [M]. Berlin:DGZFP, 2011.
- [ 12 ] FLAY N, SUN W, BROWN S, et al. Investigation of the focal spot drift in industrial cone-beam X-ray computed tomography [J]. Proceedings of the DIR, 2015.
- [ 13 ] 孔凡琴. 微焦点 X 射线检测技术的现状与应用 [J]. 无损检测, 2008, 30(12):931-933.
- KONG F Q. Current status and application of microfocus x-ray detection technology [J]. Non-destructive Testing, 2008, 30(12): 931-933.
- [ 14 ] GULLBERG, GRANT T. Estimation of geometrical parameters and collimator evaluation for cone beam tomography [J]. Medical Physics, 1990, 17(2):264.
- [ 15 ] BRONNIKOV A V. Virtual alignment of X-ray cone-beam tomography system using two calibration aperture measurements [J]. Optical Engineering, 1999, 38(2): 381-386.
- [ 16 ] HILLER J, MAISL M, REINDL L M. Physical characterization and performance evaluation of an X-ray micro-computed tomography system for dimensional metrology applications [J]. Measurement Science and Technology, 2012, 23(8):085404.
- [ 17 ] DE O, FABRÍCIO B, DE C P, et al. Characterization and correction of geometric errors induced by thermal drift in CT measurements [J]. Key Engineering Materials, 2014, 613(5):327-334.
- [ 18 ] VAVHK D, JANDEISEK I, PICHOTKA M. Correction of the X-ray tube spot movement as a tool for improvement of the micro-tomography quality [J]. Journal of Instrumentation, 2016, 11(1):C01029-C01029.
- [ 19 ] SASOV A, LIU X, SALMON P L. Compensation of mechanical inaccuracies in micro-CT and nano-CT [J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2008, doi:10.1117/12.793212.
- [ 20 ] KINGSTON A M, SAKELLARIOU A, SHEPPARD A P, et al. An auto-focus method for generating sharp 3D tomographic images [J]. Proceedings of SPIE-The

- International Society for Optical Engineering, 2010, 7804.
- [21] FU J, LI CH, LIU ZH ZH. Analysis and calibration of stage axial vibration for synchrotron radiation nanoscale computed tomography [J]. Analytical & Bioanalytical Chemistry, 2015, 407(25):7647-7655.
- [22] 王珏, 葛敏雪, 蔡玉芳, 等. 基于线框模型的锥束 CT 几何参数校正方法[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(2): 177-184.
- WANG J, GE M X, CAI Y F, et al. Method for geometric correction of cone beam CT based on wireframe model [J]. Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(2): 177-184.
- [23] 葛敏雪. 高分辨率锥束 CT 系统几何校准方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
- GE M X. Study on geometric calibration method of high resolution cone beam CT system [D]. Chongqing: Chongqing University, 2018.
- [24] 何国生, 施露露, 邹爽爽, 等. 基于自适应阈值的间充质干细胞分割方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(6):18-23.
- HE G SH, SH L L, ZOU SH SH, et al. Research on mesenchymal stem cell segmentation based on adaptive threshold [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(6):18-23.
- [25] 白立芬, 徐毓娴, 于水, 等. 基于图像处理的显微镜自动调焦方法研究[J]. 仪器仪表学报, 1999, 20(6): 612-614.

BAI L F, XU Y X, YU SH, et al. Research on automatic focusing method of microscope based on image processing [J]. Journal of Scientific Instrument, 1999, 20(6): 612-614.

### 作者简介



**蔡玉芳**(通信作者), 1998 年于西北师范大学获得学士学位, 2002 年于重庆大学获的硕士学位, 现为重庆大学副研究员和硕士生导师, 主要研究方向为仪器科学与技术、模式识别与图像处理、工业 CT 技术与系统。E-mail: caiyf@cqu.edu.cn

**Cai Yufang** (Corresponding author) received her B. Sc. degree from Northwest Normal University in 1998, and her M. Sc. degree from Chongqing University in 2002. Now, she is an associate research fellow and master student supervisor in Chongqing University. Her main research interests include instrument science and technology, pattern recognition and image processing, industrial computed tomography (CT) technology and system.



**贾琳琳**, 2017 年于南昌航空大学获得学士学位, 现为重庆大学硕士研究生, 主要研究方向为图像处理、锥束 CT 系统几何校正。E-mail: 824290711@qq.com

**Jia Linlin** received her B. Sc. degree from Nanchang Hangkong University in 2017. Now, she is a M. Sc. candidate at Chongqing University. Her main research interests include image processing and geometric correction of cone-beam CT system.