DOI:10.3969/j.issn.1671-024x.2026.04.011

光学耦合 CT 系统的焦斑漂移实时监测与补偿方法

赵金涛[1,2],吕寒玉[3],杨晓霞[1,2],王冬霞[1,2]
(1. 天津职业技术师范大学 自动化与电气工程学院,天津 300350; 2. 天津职业技术师范大学 天津市信息传感与智能控制重点实验室,天津 300350; 3. 北京智束医疗器械有限公司,北京 102629)

摘 要: 针对光学耦合 CT 系统在成像过程中因焦斑漂移带来的重建图像质量降低的问题,提出一种基于钨丝模体与电容式位移传感器的焦斑漂移实时监测与补偿方法。首先,设计了一种以金属钨丝交叉点为标志物的可调节模体,表征焦斑位置的变化;其次,建立了包含焦斑漂移、机械热偏移与金属钨丝标志点图像偏移之间的数学模型,实现焦斑漂移实时监测;最后,建立了包含焦斑漂移、机械热偏移与待测样品偏移量之间的数学模型,实现焦斑漂移的补偿。实验结果表明:利用该数学模型获取的焦斑漂移对透视图像进行偏移补偿,并进行重建,可有效提高重建图像质量,补偿后系统重建图像的调制传递函数截止空间频率从 496.7 lp/mm 提升至 555.6 lp/mm,对应空间分辨率由 1.01 μm 提升至 0.9 μm;竹纤维重建图像的中心切片边缘重叠和模糊得到明显改善,图像细节分辨更加清晰,能量梯度函数值由补偿前的 1.459×10^8 提升至 1.937×10^8,表明该方法能够有效抑制因焦斑漂移引起的图像伪影与分辨率下降,为光学耦合 CT 系统的高精度成像提供了一种可行的实时补偿方案。

关键词: 计算机断层成像(CT);光学耦合 CT 系统;焦斑漂移;机械热偏移;钨丝模体
中图分类号: TP391.41 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-024X(2026)04-0089-07

Real-time monitoring and compensation method for focal spot drift in optically coupled CT systems

Zhao Jintao[1,2], Lü Hanyu[3], Yang Xiaoxia[1,2], Wang Dongxia[1,2]
(1. School of Automation and Electrical Engineering, Tianjin University of Technology and Education, Tianjin 300350, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Information Sensing & Intelligent Control, Tianjin University of Technology and Education, Tianjin 300350, China; 3. Beijing SmartBeam Medical Devices Co., Ltd., Beijing 102629, China)

Abstract: To address the image quality degradation caused by focal spot drift in optically coupled computed tomography (CT) systems, a real-time monitoring and compensation method based on a tungsten-wire phantom and capacitive displacement sensors was proposed. First, an adjustable phantom was designed, with intersecting tungsten wires serving as fiducial markers to track focal spot drift. Second, a mathematical model was then established to correlate focal spot drift, mechanical-thermal deviation, and the image displacement of the markers. This model enabled real-time monitoring of focal spot drift. Finally, another model was developed to link focal spot drift, mechanical-thermal deviation, and sample displacement, thereby achieving focal spot compensation. The experimental results indicated that the proposed method can effectively compensate focal spot drift and improve reconstructed image quality. After compensation, the cutoff spatial frequency of the modulation transfer function increased from 496.7 lp/mm to 555.6 lp/mm, corresponding to a spatial resolution improvement from 1.01 μm to 0.9 μm. The edge overlap and blurring at the central slice of the reconstructed bamboo-fiber image were significantly mitigated, and the fine details of the image achieved superior distinguish ability. The value of energy of gradient (EOG) increased from 1.459×10^8 to 1.937×10^8 before and after compensation. This indicated that the

收稿日期: 2026-05-26
基金项目: 天津市科技计划资助项目(25YDTPJC00900);天津市教委科研计划资助项目(2022KJ111)
第一作者: 赵金涛(1988—),男,博士,讲师,主要研究方向为 CT 成像技术。E-mail:zjt2019@tju.edu.cn
通信作者: 王冬霞(1975—),女,博士,教授,主要研究方向为数字信号处理。E-mail:dxwang_lg@126.com

proposed method could effectively suppress image artifacts and resolution degradation caused by focal spot drift. The method provided a feasible real-time compensation solution for high precision imaging in optically coupled CT systems.

Key words: computed tomography (CT); optically coupled CT systems; focal spot drift; mechanical-thermal deviation; tungsten-wire phantom

计算机断层成像技术(computed tomography,CT)因其非接触、非破坏及检测速度快等特点,已在临床医学[1]、无损检测[2]、增材制造[3-4]、航空航天[5]、地球科学[6]等诸多领域得到广泛应用。近年来,随着工业检测领域对精度与分辨力要求的不断提升,逐渐向高分辨检测与精密测量方向发展,由此衍生出工业 CT、微米 CT、纳米 CT 等不同分支[7]。现如今,微米 CT 因其高分辨率、便捷性等特点,在实验室中被广泛应用,可进一步分为平板 CT 系统和光学耦合 CT 系统。其中,平板 CT 系统以平板探测器为 X 射线接收器,采用几何放大的原理,具有扫描快、成像空间大等优点;光学耦合 CT 系统以光学元件与电荷耦合元件(charge coupled device,CCD)耦合而成的探测器作为 X 射线接收器,采用几何放大和光学放大双级放大的原理,通常可实现亚微米分辨,成为微小样品亚微米分辨无损检测的重要手段之一[8]。

然而,随着空间分辨率的不断提高,学者越来越多地关注到 X 射线源焦斑漂移对系统成像质量的影响。焦斑漂移,即焦斑位置随时间的非预期移动,已成为影响高分辨率成像特别是长时间扫描图像质量的一个主要问题[9-11]。焦斑漂移主要是由热效应[10]、机械不稳定性[10]、参数变化[12]、外部磁场干扰[13]、运行时间长[14]等因素引起的。焦斑漂移会直接导致投影数据几何失真,进而在重建图像中产生多种伪影,包括伪影与边缘模糊[10]、空间分辨率下降[11, 15]、尺寸测量失准[11]等,严重影响诊断或测量的可靠性。为了消除或减弱射线源焦斑对成像质量的影响,研究者进行了大量工作,主要可以归纳为基于硬件标志物的焦斑漂移补偿和基于图像后处理的焦斑漂移补偿 2 类。

基于硬件标志物的焦斑漂移补偿指利用特质的标志物对焦斑漂移进行监测,并对焦斑漂移引起的图像偏移进行补偿。Vavřík 等[16]提出了一种基于固定于 X 射线管近焦点处的微小锡球投影位移在线监测与校正的方法,有效校正了 CT 成像中由电子束漂移和热变形引起的焦点运动,显著提升了微米级 CT 图像的分辨率与微观结构识别能力。Gwerder 等[17]提出了一种基于标记球体同步测量的高分辨率 X 射线计算机断层扫描自动漂移补偿方法,通过在扫描过程中同步监测集成于样品架中的小钢球的位置与尺寸变化,实时提取系统几何漂移(包括焦点漂移和样品位移),并将该漂移信息整合至重建算法中进行校正。

基于图像后处理的焦斑漂移补偿指在不改变硬件的情况下,通过图像算法识别焦斑漂移对图像的影响,进一步通过算法校正焦斑漂移对图像引起的偏移,以提高图像重建质量。Liu 等[18]针对实验室 X 射线纳米断层扫描系统中的焦斑漂移问题,提出了一种改进的基于轨迹正弦图质心的水平校正方法,可快速有效地校正水平方向漂移;并进一步提出了一种基于联合特征的由粗到精的投影配准方法,有效校正了纳米 CT 成像中因系统漂移引起的投影失真,显著提升了重建图像的空间分辨率与细节清晰度[19]。Messner 等[10]针对滑环 CT 系统,研究了焦点位置漂移对高分辨率锥束 CT 图像质量的影响,将焦斑尺寸切换和热漂移等引起的位移模型整合到系统的几何校准流程中,进一步分析射线源焦斑、探测器的位姿关系,以补偿系统不稳定的影响,从而有效减轻高分辨率锥束 CT 图像中由于投影数据几何失真而产生的伪影。Tilley 等[20]针对平板锥束 CT 在高几何放大倍率下因扩展焦点引起的图像模糊问题,提出了一种位移可变的 X 射线焦点模糊模型,并将其整合至基于模型的迭代重建算法中,从而提升图像空间分辨率、减少伪影。Bircher 等[11]提出一种基于光学 CMOS 传感器的 X 射线管跟踪系统,用于实时测量与补偿工业 CT 中的焦点漂移,可实现预热后亚微米级焦点稳定性。

然而,上述相关方法均针对纳米 CT 或平板 CT 系统进行设计,不能直接应用于光学耦合 CT 系统。相比于平板 CT 系统,光学耦合 CT 系统的空间分辨率进一步提高,最优可达亚微米量级,因此,X 射线源焦斑漂移对成像质量的影响进一步凸显;另一方面,光学耦合 CT 系统通常在成像时耗时较长,导致系统温度发生变化,从而使得机械系统发生热偏移,亦会对成像质量产生影响。因此,为了提升光学耦合 CT 系统的成像质量,降低焦斑漂移和机械系统热偏移对成像的影响,本文提出了一种适用于光学耦合 CT 系统的焦斑漂移实时监测与补偿方法,利用模体和电容式位移传感器对光学耦合 CT 系统成像过程中的焦斑漂移和机械热偏移进行实时监测,并建立补偿数学模型,从而实现焦斑漂移的实时监测与补偿。

1　光学耦合 CT 系统介绍

光学耦合CT 系统采用几何放大和光学放大的双级放大结构，主要由 X 射线源、样品旋转台、光学耦合探测器以及控制系统等构成，原理如图 1 所示。前端为几何放大结构，其原理与平板 CT 类似；后端为光学耦合探测器，由光学元件和制冷型 CCD 耦合而成，可将经闪烁体转化后的可见光图像进行二次放大，成像至制冷型 CCD，从而获取样品的数字透视（digital radiography，DR）图像，并经数据处理与重构获取样品的三维信息[8]。

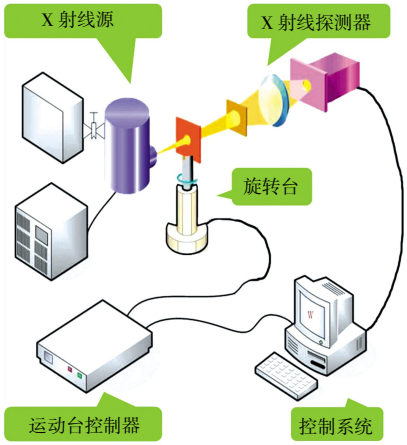


图 1　光学耦合 CT 系统原理

Fig.1　Principle of optically coupled CT system

2　焦斑漂移监测与补偿数学模型

2.1　焦斑漂移监测与补偿数学模型的构建思路

在 CT 扫描过程中，X 射线对模体进行多帧成像，当射线源焦斑位置无漂移及机械热偏移时，其多帧投影图像位置不发生变化；然而，成像过程中往往会伴随焦斑漂移以及机械热偏移，从而导致模体在多帧图像中的投影位置发生变化。因此，通过分析多帧图像中模体成像位置的偏移情况，并利用电容式位移传感器监测每帧图像对应的机械热偏移情况，即可建立图像偏移量、机械热偏移（通过传感器监测获取）、焦斑漂移之间的数学关系模型，实现焦斑漂移的实时监测；进一步建立焦斑漂移、机械热偏移、系统参数和待测样品图像偏移量之间的关系，即可实现焦斑漂移的实时补偿。数学关系模型具体可分为焦斑漂移实时监测模型和焦斑漂移补偿模型。

2.2　焦斑漂移实时监测模型

当利用 CT 系统进行扫描成像时，以采集的第 1 帧图像为基准，当采集第 k 帧图像时，若射线源焦斑的漂移量为 (u_k, v_k) 时，会导致模体标志点的投影图像产生偏移，如图 2 所示。

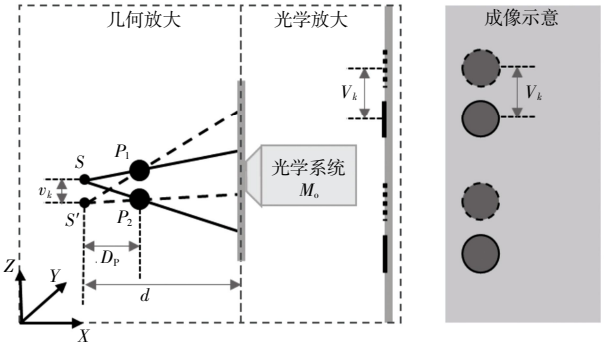


图 2　焦斑漂移示意

Fig.2　Schematic of focal spot drift

图 2 中：点 S 为射线源焦斑初始位置；S' 为某一帧采集图像时焦斑漂移后的位置；P_1、P_2 为模体上的 2 个标志点；d 为射线源焦斑到闪烁体的距离；M_o 为 CCD 光学耦合探测器的放大倍数；D_P 为射线源焦斑到模体的距离。偏移量为：

$$\begin{cases} U_k = u_k \cdot M_s \\ V_k = v_k \cdot M_s \end{cases} \tag{1}$$

式中：M_s 为偏移量放大倍数，可表示为：

$$M_s = \frac{d - D_P}{D_P} \cdot M_o \tag{2}$$

由于反射靶 X 射线源焦斑通常在射线源内部，因此 D_P 无法通过直接测量方法获得，可根据其任一帧投影图像获得，其表达式为：

$$D_P = \frac{d \cdot D_c \cdot M_o}{D_m} \tag{3}$$

式中：D_m 为模体中两标志点之间的距离；D_c 为模体 2 标志点投影图像之间的距离，可表示为：

$$D_c = \sqrt{(u_{1k} - u_{2k})^2 + (v_{1k} - v_{2k})^2} \cdot P_s \tag{4}$$

式中：(u_{1k}, u_{2k}) 和 (v_{1k}, v_{2k}) 分别为 2 标志点在第 k 帧投影图像中的坐标；P_s 为 CCD 像元尺寸。

另一方面，由于 CT 系统内 X 射线源等在运行过程中会产生热量，导致系统内温度升高，从而使得射线源、探测器及机械结构等存在热偏移；前期研究表明其沿 X 向机械热偏移对图像影响较小[21]，且实验表明射线源沿 Z 向机械热偏移量不超过 0.5 μm，因此，只需考虑 Y 向机械热偏移对图像的影响即可。当射线源存在 Y 向机械热偏移 D_{Sk}、探测器存在 Y 向机械热偏移 D_{Dk} 时，亦会导致图像产生偏移量，此时由射线源焦斑漂移和热漂移引起的图像总偏移量 (U_k', V_k') 为：

$$\begin{cases} U_k' = U_k + (D_{Sk} - D_{Dk}) \cdot M_o \\ V_k' = V_k \end{cases} \tag{5}$$

即：

$$\begin{cases} U_k' = u_k \cdot \dfrac{d - D_P}{D_P} \cdot M_o + (D_{Sk} - D_{Dk}) \cdot M_o \\ V_k' = V_k \cdot \dfrac{d - D_P}{D_P} \cdot M_o \end{cases} \tag{6}$$

根据式(6)可建立射线源焦斑漂移量与图像偏移、机械热偏移(用传感器数据进行表征)之间的数学关系模型，即焦斑沿 Y 轴和 Z 轴的漂移量(u_k, v_k)分别为：

$$\begin{cases} u_k = \left(\dfrac{U_k'}{M_o} + D_{Dk} - D_{Sk}\right) \cdot \dfrac{D_P}{d - D_P} \\ v_k = \dfrac{V_k'}{M_o} \cdot \dfrac{D_P}{d - D_P} \end{cases} \tag{7}$$

2.3　焦斑漂移补偿模型

当射线源焦斑存在漂移量(u_k, v_k)时，引起的样品图像偏移量为：

$$\begin{cases} X_k = \dfrac{d - f}{f} \cdot M_o \cdot u_k \\ Y_k = \dfrac{d - f}{f} \cdot M_o \cdot v_k \end{cases} \tag{8}$$

式中：f 为射线源焦斑到样品旋转体中心旋转轴的距离。

考虑射线源、探测器沿 Y 向的机械热偏移，则焦斑漂移和机械热偏移引起的图像总偏移量(X_k', Y_k')为：

$$\begin{cases} X_k' = X_k + (D_{Sk} - D_{Dk}) \cdot M_o \\ Y_k' = Y_k \end{cases} \tag{9}$$

利用上述所求取的图像偏移量，对样品图像进行修正，即可实现焦斑漂移的补偿。

2.4　评价函数

为定量分析评价焦斑漂移对重建图像的影响，利用能量梯度函数(energy of gradient，EOG)对补偿前后的中心切片图像进行评价。能量梯度函数将 x 方向和 y 方向的相邻像素的灰度值之差的平方和作为每个像素点的梯度值，对所有像素梯度值累加作为清晰度评价函数值，表示为：

$$F = \sum_x \sum_y \{[f(x+1, y) - f(x, y)]^2 + [f(x, y+1) - f(x, y)]^2\} \tag{10}$$

3　钨丝模体的设计

根据前述数学模型，所设计的模体须在投影图像中形成不少于 2 个的稳定标志点。因此，需综合考虑以下因素。

(1) 为提高高电压扫描时图像的对比度，模体材质应采用高原子序数材料。

(2) 为提高标志点坐标确定精度，选用金属丝十字交叉点作为焦斑漂移的标志点。

(3) 应选择合适粗细的金属钨丝。直径过小将导致投影图像对比度不足，增加数据处理难度；直径过大则易遮挡视野，与样品成像重叠。

(4) 为便于模体的安装和调整，模体需包含位置调节机构。

综合上述因素，设计如图 3 所示的钨丝模体结构，包括支撑结构、金属钨丝和定位顶丝。

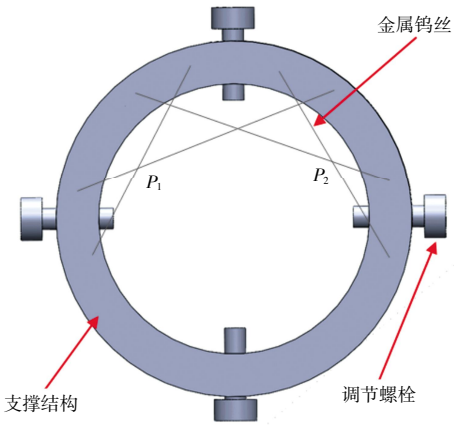


图 3　钨丝模体结构

Fig.3　Structure of tungsten wire phantom

图 3 中：支撑结构材质为铝，用于支撑金属钨丝和安装定位顶丝；金属钨丝直径为 15 μm，可按照需要粘贴于支撑结构上，2 条钨丝相交点即可形成 1 个标志点；定位顶丝用于调整模体在射线出射口的位置，保证标志点在成像视野内，且金属钨丝成像不与样品成像重叠；另外，由于其直径仅为 15 μm，在成像中引起的局部射束硬化或散射干扰极低，不会对待测样品的局部灰度及重建产生影响。

4　实验验证及分析

为验证上述数学模型的可行性与有效性，本文采用自行研制的钨丝模体作为标志物，并以直径 500 μm 的氧化锆微球为待测对象，在实验室光学耦合 CT 系统上进行焦斑漂移实验验证，如图 4 所示。系统采用日本滨松光子学株式会社 Hamamatsu L10101 型射线源，成像探测器选用英国安道尔技术公司 Andor DW936N-BV 型背照式制冷 CCD 相机，位移测量设备采用美国雄狮精仪公司的电容式位移传感器，对微球样品进行 360°旋转扫描，共采集 720 帧投影图像，实验条件如表 1 所示。

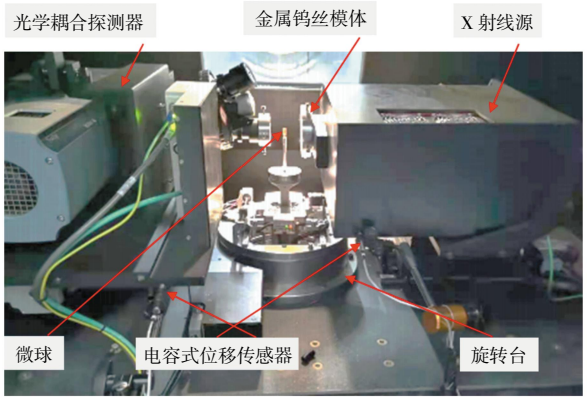


图 4　光学耦合 CT 系统

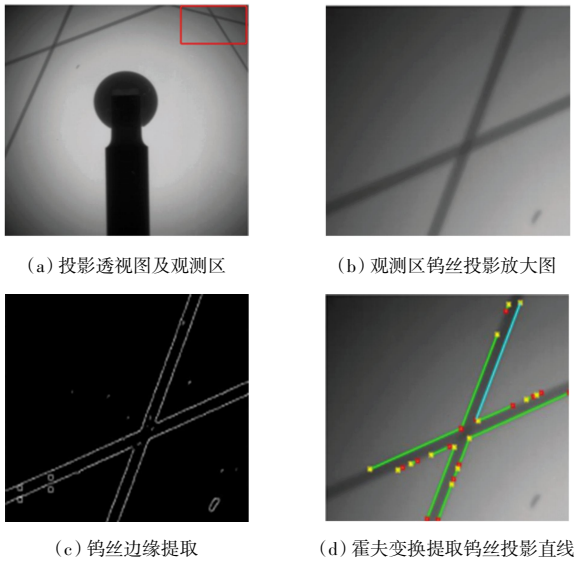
Fig.4　CCD–coupled CT system

表 1　实验参数

Tab.1　Experiment parameters

参数	数值
电压/kV	80
电流/μA	80
f/mm	20
d/mm	55
光学放大倍数	20
投影图像大小/像素	1 024×1 024
曝光时间/s	45
扫描帧数	720

本文结合霍夫变换与最小二乘直线拟合法来实现标志点投影坐标的高精度提取，如图 5 所示。具体步骤如下：采用 Canny 算子对投影图像进行边缘提取；利用霍夫变换从标志物图像中识别出 2 组交叉直线；分别对 2 组直线进行最小二乘拟合，得到中心线方程；通过求解 2 条中心线的交叉点坐标，确定标志点的投影坐标。



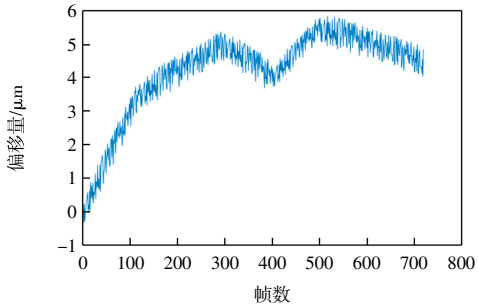
（a）投影透视图及观测区　（b）观测区钨丝投影放大图

（c）钨丝边缘提取　（d）霍夫变换提取钨丝投影直线

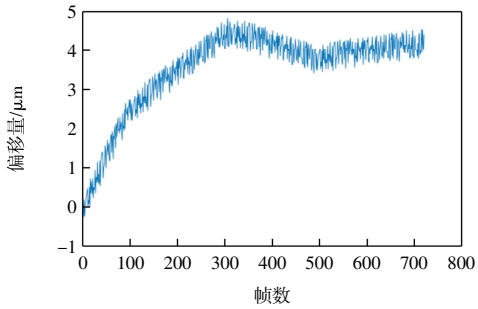
图 5　提取标志点投影坐标

Fig.5　Extracting projection coordinates of marker points

在获取标志点坐标后，以第 1 帧图像为基准，分别获取另外 719 帧图像标志点的偏移量；同时，通过位移传感器采集的数据，获取机械热偏移所导致的射线源和探测器引起的 *Y* 向偏移量；并利用前述焦斑漂移实时监测数学模型分析焦斑偏移量，如图 6 所示。



（a）焦斑沿 *Y* 方向的偏移情况



（b）焦斑沿 *Z* 方向的偏移情况

图 6　焦斑漂移曲线

Fig.6　Focal spot drift curve

由图 6 可知，在扫描前 300 帧（约 3.75 h）时，焦斑位置呈现较为剧烈的单向漂移，这是由于射线源高功率运行初期阳极靶处热量迅速积聚，导致阳极靶发生非均匀热膨胀；随着扫描时间增加，射线源内部热平衡基本建立，焦斑漂移趋于稳定。因此，对于无需高精度实时补偿的常规扫描，可在成像前对设备充分预热 3~4 h，以使设备进入稳定期，从而提高成像质量。

本文利用已获取的焦斑漂移数据及其补偿模型对微球图像位置进行校正，分别对原始与补偿后的微球投影图像进行重建；选取第 512 层重建切片的微球轮廓边缘过渡带作为研究对象，通过计算边缘扩散函数求导获得线扩散函数，并经傅里叶变换得到相应切片的调制传递函数（modulation transfer function，MTF）曲线，如图 7 所示。由图 7 可以看出，经补偿后重建图像切片的截止空间频率由 496.7 lp/mm 提升至 555.6 lp/mm，对应空间分辨率由 1.01 μm 优化至 0.9 μm。上述结果证明，通过对投影数据实施焦斑漂移补偿，能够有效提升三维重建图像的空间分辨能力。

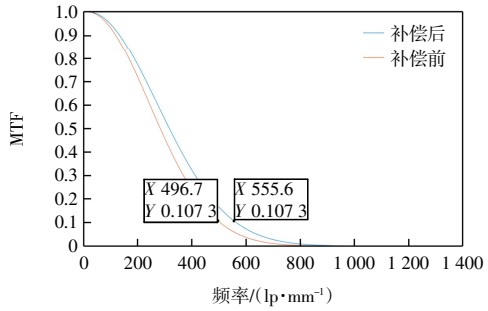
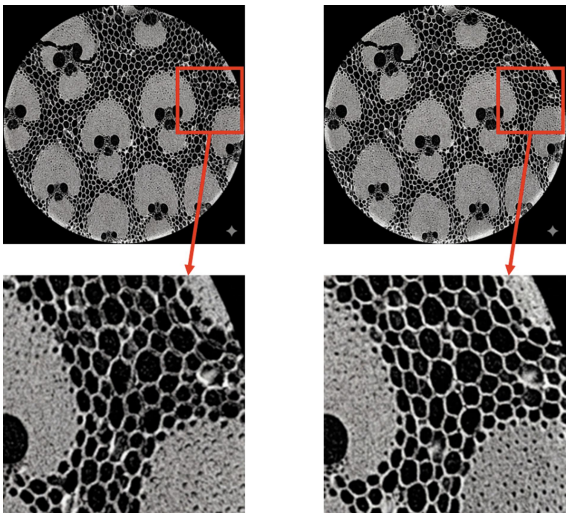


图 7　补偿前后重建切片 MTF 对比

Fig.7　Comparison of MTF of reconstruction slices before and after compensation

为进一步验证焦斑漂移对系统重建带来的影响，利用系统对竹纤维进行重建成像。首先，假定系统处于理想状态，不对焦斑漂移引起的图像偏移进行补偿，直接对竹纤维进行成像并重建；其次，在成像过程中对焦斑漂移状况进行实时监测以获取焦斑漂移数据，利用上文补偿方法对焦斑漂移引起的图像偏移进行补偿，补偿后再次进行三维重建，并对补偿重建前后的同一切片的同一位置分别进行局部放大对比。补偿前后竹纤维中心切片的重建结果对比如图 8 所示。



(a) 补偿前　　(b) 补偿后

图 8　补偿前后竹纤维中心切片重建结果对比

Fig.8　Comparison of bamboo-fiber reconstruction results before and after compensation

由图 8 可以看出，焦斑漂移补偿重建前后的中心切片图像在整体上保持高度一致。由局部放大图片可以看出，补偿重建前，管壁表现出弥散现象，过渡边界变宽、暗淡且出现叠影，导致图像细节模糊；补偿重建后，管壁呈现连续、清晰且较窄的黑白过度边界，未出现光晕或重影，表现出较高的高频空间反差。由此表明，经过焦斑漂移补偿后再重建图像，可有效改善边缘重叠和模糊，使得图像细节分辨更加清晰，重建效果更好。计算重建图像的能量梯度函数值，补偿前后重建图像 EOG 分别为 1.459×10^8 和 1.937×10^8。由此可知，补偿后中心切片图像的能量梯度函数值大于补偿前，图像边缘更加锐利清晰，重建效果更好。

5　结　论

针对光学耦合 CT 系统成像时间较长，会存在焦斑漂移导致重建图像质量下降的问题，提出了一种焦斑漂移实时监测与补偿方法。该方法利用自制钨丝模体和电容式位移传感器监测焦斑漂移和机械热偏移，建立焦斑漂移、机械热偏移、系统参数、标志点投影偏移量之间的数学关系模型，实现焦斑漂移的实时监测；进一步，建立焦斑漂移、机械热偏移、系统参数、待测样品投影图像偏移量之间的数学关系模型，实现焦斑漂移的补偿。结论如下。

(1) 该方法能有效补偿焦斑漂移的影响，提高重建图像的质量，补偿后系统重建图像的调制传递函数截止空间频率从 496.7 lp/mm 提升至 555.6 lp/mm，对应空间分辨率由 1.01 μm 提升至 0.9 μm。

(2) 竹纤维重建图像的中心切片边缘重叠和模糊得到明显改善，微小细节的分辨能力得到提升，能量梯度函数值由补偿前的 1.459×10^8 提升至 1.937×10^8，为光学耦合 CT 系统在长时间、高分辨扫描中的稳定性提升提供了方法。

(3) 然而，本方法依赖钨丝模体，该模体会占据部分成像视场，导致有效成像视野缩小。未来将探索无模体条件下的自标定算法，并优化数学模型和补偿流程，以进一步提升补偿方法在不同成像条件和系统配置中的适用性。

参考文献：

[1] Greco A, Meomartino L, Gnudi G, et al. Imaging techniques in veterinary medicine. Part Ⅱ: Computed tomography, magnetic resonance imaging, nuclear medicine[J]. European Journal of Radiology Open, 2023, 10: 100467.

[2] Villarraga-Gómez H, Herazo E L, Smith S T. X-ray computed tomography: From medical imaging to dimensional metrology[J]. Precision Engineering, 2019, 60: 544-569.

[3] Segovia Ramírez I, García Márquez F P, Papaelias M. Review on additive manufacturing and non-destructive testing[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2023, 66: 260-286.

[4] Du Plessis A. X-ray tomography for the advancement of laser powder bed fusion additive manufacturing[J]. Journal of Microscopy, 2022, 285(3): 121-130.

[5] 章镇, 肖鹏. 工业 CT 在航空工业的应用[J]. 测控技术, 2023, 42(2): 1-6.

Zhang Zhen, Xiao Peng. Application of industrial CT in aviation[J]. Measurement & Control Technology, 2023, 42(2): 1–6(in Chinese).

[6] 汤戈, 赵欣雨, 王宇翔, 等. 工业 CT 技术在地球科学中的应用[J]. CT 理论与应用研究(中英文), 2024, 33(1): 119–134.
Tang Ge, Zhao Xinyu, Wang Yuxiang, et al. Applications of industrial computed tomography technology in the geosciences[J]. CT Theory and Applications, 2024, 33(1): 119–134(in Chinese).

[7] Withers P J, Bouman C, Carmignato S, et al. X–ray computed tomography[J]. Nature Reviews Methods Primers, 2021, 1: 18.

[8] 邹晶, 蒋一鸣, 胡晓东, 等. 光学耦合 CT 系统几何位姿参数标定方法[J]. 光子学报, 2022(4): 051.
Zou Jing, Jiang Yiming, Hu Xiaodong, et al. Calibration method for geometric pose parameters of optically coupled CT system[J]. Acta Photonica Sinica, 2022(4): 051(in Chinese).

[9] Francken N, Sanctorum J, Huyge B, et al. Correcting for focal spot drift in edge illumination X–ray phase contrast imaging[J]. e–Journal of Nondestructive Testing, 2025, 30(2): 1–7.

[10] Messner I M, Keuschnigg P, Stöllinger B, et al. Investigating focal spot position drift in a mobile imaging system equipped with a monobloc–based X–ray generator[J]. Medical Physics, 2024, 51(5): 3578–3589.

[11] Bircher B A, Meli F, Küng A, et al. X–ray source tracking to compensate focal spot drifts for dimensional CT measurements[J]. e–Journal of Nondestructive Testing, 2020, 25(2): e02043 .

[12] Shimakawa Y, Nishiki M, Yanagita S, et al. Evaluation of X–ray effective focal spot size dependency on X–ray exposure settings using edge response analysis[J]. Radiological Physics and Technology, 2023, 16(1): 39–47.

[13] Lillaney P, Shin M, Hinshaw W, et al. Electrostatic focal spot correction for X–ray tubes operating in strong magnetic fields[J]. Medical Physics, 2014, 41(11): 112302.

[14] Obodovskiy A V, Bessonov V B, Larionov I A. Shift focal spot X–ray tube to the imposition anode under long exposure[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2018, 967: 012010.

[15] Tilley II S, Zbijewski W, Stayman J W. High–fidelity modeling of shift–variant focal–spot blur for high–resolution CT[C]// The 14th International Meeting on Fully Three–Dimensional Image Reconstruction in Radiology and Nuclear Medicine. Xi′an, China: Fully3D 2017 Proceedings, 2017: 752–759.

[16] Vavřík D, Jandejsek 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.

[17] Gwerder D, GmbH M, Willner M, et al. Automated drift compensation procedure for high–resolution XCT imaging based on simultaneous measurement of marker sphere[J]. e–Journal of Nondestructive Testing, 2024, 29(3): 29255.

[18] Liu M N, Han Y, Xi X Q, et al. Horizontal drift correction by trajectory of sinogram centroid fitting for laboratory X–ray nanotomography[C]//Proceedings of SPIE Conference on International Conference on Optics and Image Processing (ICOIP 2021). Guilin, China: SPIE, 2021: 127.

[19] Liu M N, Yu H, Xi X Q, et al. Drift correction in laboratory nanocomputed tomography using joint feature correlation [J]. Applied Optics, 2023, 62(11): 2784–2791.

[20] Tilley I S, Zbijewski W, Siewerdsen J H, et al. Modeling shift–variant X–ray focal spot blur for high–resolution flat–panel cone–beam CT[C]//International Conference on Image Formation in X–ray Computed Tomography, 2016: 463–466.

[21] Sun Y, Hou Y, Zhao F Y, et al. A calibration method for misaligned scanner geometry in cone–beam computed tomography[J]. NDT & E International, 2006, 39(6): 499–513.

本文引文格式:

赵金涛, 吕寒玉, 杨晓霞, 等. 光学耦合 CT 系统的焦斑漂移实时监测与补偿方法[J]. 天津工业大学学报, 2026, 45(4): 89–95.
Zhao Jintao, Lü Hanyu, Yang Xiaoxia, et al. Real–time monitoring and compensation method for focal spot drift in optically coupled CT systems[J]. Journal of Tiangong University, 2026, 45(4): 89–95(in Chinese).

(责任编辑:孙广宇)

(上接第 89 页)

[31] Zheng C, Zhu S J, Mendieta M, et al. 3D human pose estimation with spatial and temporal transformers[C]//2021 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV). Montreal, QC, Canada: IEEE, 2021: 11636–11645.

[32] Egawa R, Miah A S M, Hirooka K, et al. Dynamic fall detection using graph–based spatial temporal convolution and attention network[J]. Electronics, 2023, 12(15): 3234.

[33] Fei K X, Wang C, Zhang J X, et al. Flow–pose Net: An effective two–stream network for fall detection[J]. The Visual Computer, 2023, 39(6): 2305–2320.

[34] Li S Y, Song X, Xu S Y, et al. Dilated spatial–temporal convolutional auto–encoders for human fall detection in surveillance videos[J]. ICT Express, 2023, 9(4): 734–740.

本文引文格式:

李现国, 段显霖, 杨彦利, 等. 基于二维和三维人体姿态估计的跌倒检测[J]. 天津工业大学学报, 2026, 45(4): 80–88, 95.
Li Xianguo, Duan Xianlin, Yang Yanli, et al. Fall detection based on 2D and 3D human pose estimation[J]. Journal of Tiangong University, 2026, 45(4): 80–88, 95(in Chinese).

(责任编辑:孙广宇)