

基于动态电流的锥束 CT 环状伪影校正方法

陈思宇 李 磊 闫 镔* 席晓琦 张 峰 韩 玉 张 翔 邓 林 李建新

国家数字交换系统工程技术研究中心, 河南 郑州 450002

摘要 为了去除平板探测器中坏点和响应不一致探元引起的环状伪影对 X 射线计算机断层成像(CT)质量的影响,利用探元响应与管电流的线性相关关系,提出了一种基于探测器校正的环状伪影去除方法。检测出不同管电流下响应恒定的探元后,分别计算每个探元响应与管电流的相关系数,并检测出响应随机变化和迅速达到最大的探元,将检测出的探元记入坏点模板并进行校正。以单个管电流下所有探元响应的均值为基准,计算同一组管电流下各探元响应曲线方程与基准曲线方程的转化关系,得到探测器的一致性校正参数矩阵。依据坏点模板和一致性校正参数对各探元的输出响应进行校正。实验结果表明,该方法能够有效去除环状伪影,并改善图像信噪比。解决了现有坏点检测方法中阈值选择困难的问题,可适用于多种类型的探测器。

关键词 X 射线光学; 环状伪影校正; 相关性分析; 坏点检测; 一致性校正

中图分类号 TP391; O434.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0634001

Ring Artifacts Correction Method Based on Dynamic Current for Cone Beam CT

Chen Siyu Li Lei Yan Bin Xi Xiaoqi Zhang Feng Han Yu
Zhang Xiang Deng Lin Li Jianxin

National Digital Switching System Engineering and Technological Research Center, Zhengzhou, Henan 450002, China

Abstract In the flat panel detector, the ring artifacts caused by the defective and response non-uniformity pixels will affect the quality of X-ray computed tomography (CT). In order to solve the issue, the linear correlation between pixel response and tube current is applied, and a ring artifact removal method based on detector calibration is proposed. The pixels are detected, whose response is constant under different tube currents. Then the pixels with the response varying randomly or quickly reaching up to the maximum value are detected, and the correlation coefficients between each pixel channel response and the tube current are calculated. The pixels detected with the above mentioned methods are written into defective pixels map and corrected. With the reference of average response of all pixels under each tube current, the relationship between response and reference curve of the pixels under the same tube currents is calculated to obtain the identical correction matrixes of the detector. The output responses of the pixel are corrected according to the defective pixels map and the identical correction matrixes. Experimental results show that the proposed method can removes the ring artifacts effectively, and improves the signal to noise ratio of reconstruction image. In addition, it solves the problem of threshold selection with the existing defective pixel detection methods, which can be applied to different types of detectors.

Key words X-ray optics; ring artifacts correction; correlation analysis; defective pixels detection; identical correction

OCIS codes 340.7440; 100.2000; 110.7440

收稿日期: 2016-01-08; **收到修改稿日期:** 2016-02-18

基金项目: 国家自然科学基金(61372172)

作者简介: 陈思宇(1990—), 女, 硕士研究生, 主要从事 CT 伪影校正算法方面的研究。

E-mail: chensiyuxd@163.com

导师简介: 李建新(1954—), 男, 硕士, 教授, 主要从事成像技术与智能信息处理方面的研究。

E-mail: xdljianxin@sohu.com

* **通信联系人.** E-mail: ybSPACE@hotmail.com

1 引 言

锥束计算机断层成像(CT)系统主要由 X 射线源、平板探测器、机械系统和计算机组成,能够在无损条件下得到物体内部三维结构图像,已广泛应用于无损检测和医疗诊断等领域。实际中受平板探测器制造工艺的影响,在相同射线能量照射下,各探元响应存在差异。探元响应间的差异作为一种引发环状伪影的主要因素,容易导致 CT 重建^[1]图像中出现一系列以重建中心为圆心的同心圆环^[2-3]。这些环状伪影严重降低了重建图像的质量,干扰了后续对图像的分析^[4]。因此研究环状伪影校正方法,去除环状伪影具有重要的实际意义。

目前的环状伪影校正方法主要有 4 类:探测器校正法^[5],扫描平移校正法^[6],投影预处理校正法^[7]和图像后处理校正法^[8-10]。由于平板探测器的探元在短期内稳定,上述方法中探测器校正法实用性最强。将探测器的校正参数生成模板,对每次成像时加载模板进行校正,使用一段时间后更新模板即可,与其他 3 种方法相比具有较强的灵活性,不受成像物体影响。其中检测探测器坏点进而生成坏点分布模板是探测器校正法的一个关键步骤^[11]。

坏点检测方法通常先采集一定曝光水平下未放置任何物体时的探测器输出图像,即曝光图像,然后计算该图像的探元响应的均值、方差和增益系数等参数,再基于这些参数设置阈值来识别坏点。检测坏点的方法:1)直接计算曝光图像中探元响应的均值和方差,将方差超过一定范围的探元认为是坏点;2)计算探元响应的增益系数,将增益系数超过一定范围的探元标记为坏点^[12]。这 2 种方法易受曝光不均匀的影响,且较难确定合适的阈值。Tang 等^[13]提出一种基于小波分析的坏点检测方法效果较好,不受曝光不均匀的影响,但需根据坏点分布情况,将呈点状、簇状或线状分布的坏点分开检测,检测结果显然受坏点分布形式影响,且不能准确定位坏点的位置。Park 等^[14]提出坏点图生成方法通过正反小波变换得到坏点分布信息,不需要将坏点按分布情况进行分类,但仍需与基于均值和方差的坏点检测方法配合使用。Altunbas 等^[15]提出一种针对簇状分布坏点的检测方法,通过曲线拟合计算探测器每行响应的理想值,并以 4 倍的标准差为阈值进行坏点检测。

上述方法在坏点检测时均存在如下问题:若阈值限制不严,则坏点识别不全,在之后的探测器一致性校正中未被检测出的坏点不能得到有效校正,导致重建图像中有环状伪影残留。反之,若阈值限制过严,则检测得到的坏点数量过多,后续再采用插值法对大量的坏点进行校正将不利于图像细节的保留。并且,不同的探测器需要不同的阈值进行检测。

针对上述问题,根据探元响应与管电流线性相关的特点,本文提出一种基于动态电流的锥束 CT 环状伪影校正方法。在不同探测器平台上根据所得到的坏点模板和一致性校正参数对探元的输出响应进行校正,验证了该方法的可行性和优越性。

2 探测器校正原理及方法

2.1 探元响应与管电流间的关系

由辐射探测器的工作原理可知,在一定范围内探测器产生的信号与入射射线强度成正比。其中,X 射线的强度 E_0 可以用表示为^[16]

$$E_0 = kZIV^m, \quad (1)$$

式中 k 为比例系数, Z 为靶材料的原子序数, I 、 V 分别为 X 射线管电流和管电压,参数 m 约等于 2。在固定管电压下,一定曝光时间内探元响应与 I 之间具有线性相关关系^[17-18]

$$g(x, y) = a(x, y)I + b(x, y), \quad (2)$$

式中 $g(x, y)$ 为探元 (x, y) 处的响应, $a(x, y)$ 为关系曲线的斜率, $b(x, y)$ 为关系曲线的截距,其中包括了无射线照射时探元的暗电流输出。实际应用中,暗电流输出作为噪声,需从投影图像中扣除^[12]。由(2)式可知,任意两探元对应的响应—管电流关系曲线 $g(x_1, y_1) = a(x_1, y_1)I + b(x_1, y_1)$ 和 $g(x_2, y_2) = a(x_2, y_2)I + b(x_2, y_2)$ 也具有转化关系

$$g(x_2, y_2) = g(x_1, y_1)P_1 + Q_1, \quad (3)$$

式中 $P_1 = a(x_2, y_2)/a(x_1, y_1)$, $Q_1 = b(x_2, y_2) - b(x_1, y_1) \cdot a(x_2, y_2)/a(x_1, y_1)$ 。

2.2 探元的分类

实际应用中,不同管电流下探元的响应具体表现如图 1 所示。

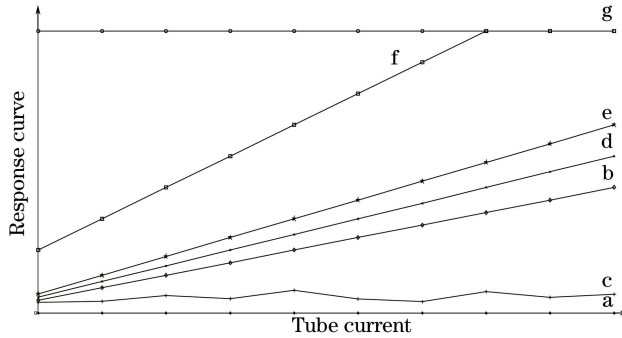


图 1 几种探元响应曲线示意图

Fig. 1 Response curves with different kinds of pixels

2.1 节中分析表明,正常情况下探元响应与管电流线性相关。然而,受平板探测器制造工艺的影响,个别探元对 X 射线响应存在异常。可认为探元响应-管电流关系偏离如图 1 中 d 曲线所示线性关系的都是坏点,并根据响应的不同将坏点分为两类:

- 1) 输出值恒定的探元,包括射线管电流增加时输出值恒定为 0、最大值或其他常数的探元,如图 1 中的曲线 a 和 g,这类探元的响应不随管电流的变化而变化;
- 2) 输出值变化异常的探元,包括射线管电流增加时输出曲线斜率过大响应迅速达到最大值和输出值随机变化的探元,如图 1 中的曲线 f 和 c,这类探元的响应-管电流关系曲线不满足(2)式。

此外,还有几种情况探元响应与管电流满足(2)式的线性关系,但是关系方程不同,这类探元称为响应不一致探元。其出现是由于探元存在个体差异,对强度相同的 X 射线响应不一致,所以表示各探元响应与管电流线性关系曲线的方程也具有随机性,如图 1 中的曲线 b 和 e。

坏点和响应不一致探元都会导致重建图像中出现环状伪影,但是二者的输出响应与管电流关系不同,需要分别加以校正。

2.3 探测器校正

基于坏点的分类检测和一致性校正的探测器校正方法基本流程如图 2 所示。对两类坏点分开检测,得到坏点模板 D ,根据 D 中的位置先对坏点进行校正,再计算探元的一致性校正参数矩阵 P 、 Q ,然后对响应不一致探元进行校正。

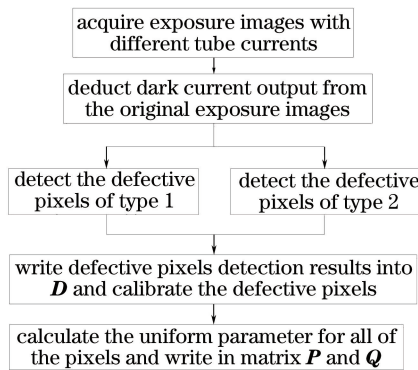


图 2 探测器校正流程图

Fig. 2 Flow chart of detector correction algorithm

2.3.1 坏点检测及校正

对于第一类坏点,可以通过判断不同管电流下单个探元响应的增量是否为零进行检测,并在坏点记录模板 D 中将坏点所在位置记为 0。

对于第二类坏点,其响应与管电流不满足(2)式的线性相关关系,针对这类坏点提出一种基于相关性分

析的检测方法。

设探测器上探元数量为 $M \times N$, X 射线管电流的连续递增序列为 $I = (I_1, I_2, \dots, I_n)$, 生成一组长度为 m 的伪随机数 r , 对 I 重新排列得到随机序列 $I_r = (I_{r_1}, I_{r_2}, \dots, I_{r_m})$, 则探元 (x, y) 对应的响应序列 $g_{I_r}(x, y) = [g_{I_{r_1}}(x, y), g_{I_{r_2}}(x, y), \dots, g_{I_{r_m}}(x, y)]$ 。

选择用皮尔逊相关系数 $\rho(x, y)$ 来度量 I_r 与 $g_{I_r}(x, y)$ 之间的相关程度, 具体为

$$\rho(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^m (I_{r_i} - \bar{I}_r) [g_{I_{r_i}}(x, y) - \overline{g_{I_r}}(x, y)]}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (I_{r_i} - \bar{I}_r)^2 \sum_{i=1}^m [g_{I_{r_i}}(x, y) - \overline{g_{I_r}}(x, y)]^2}}, \quad (4)$$

式中 \bar{I}_r 为序列 I_r 的平均值, $\overline{g_{I_r}}(x, y)$ 为序列 $g_{I_r}(x, y)$ 的平均值。利用(4)式可以得到所有探元对应的相关系数矩阵 ρ , 再进行坏点检测,

$$D(x, y) = \begin{cases} 0, & \rho(x, y) < q \\ 1, & \rho(x, y) \geq q \end{cases}, \quad (5)$$

式中 q 为坏点检测的阈值, 实验表明 q 取 0.9 能够满足多种不同类型探测器的坏点检测需要。矩阵 D 中取值为 0 的点即为坏点, 根据坏点的位置投影图像中利用文献[19]中的双向线性插值法对坏点进行校正。

2.3.2 一致性校正

受探元差异影响, 相同管电流下各探元的响应不一致, 若不加以校正同样会造成环状伪影^[15]。坏点校正后全部探元响应—管电流关系均满足(2)式, 由于全部探元响应的均值代表了探元响应的平均水平, 故在一致性校正中以不同管电流下所有探元响应的平均值作为基准。令某电流下所有探元响应的平均值为

$$\bar{g} = \sum_{y=1}^N \sum_{x=1}^M g(x, y) / (M \cdot N), \quad (6)$$

则序列 I 对应的探元响应的平均值序列为

$$\bar{g}_I = (\bar{g}_{I_1}, \bar{g}_{I_2}, \dots, \bar{g}_{I_n}), \quad (7)$$

代入(2)式可知 $\bar{g}_I = a_0 I + b_0$, 以 \bar{g}_I 为基准序列, 将其他探元的响应输出 $g_I(x, y)$ 利用(3)式向 \bar{g}_I 做一致性校正, 得到

$$g'_I(x, y) = g_I(x, y)P(x, y) + Q(x, y), \quad (8)$$

式中 $P(x, y) = a_0/a(x, y)$, $Q(x, y) = b_0 - b(x, y) \cdot a_0/a(x, y)$ 。这样全部探元响应均被校正到均值水平, 并得到所有探元的一致性校正系数矩阵 P 和矩阵 Q 。

3 实验结果与分析

为验证有效性和适用性, 在不同类型探测器上开展 3 组实验, 并与文献[12]中的基于偏置、增益和探测器坏点模板的传统校正方法进行比较。具体实验参数如表 1 所示。

表 1 实验参数

Table 1 Experimental parameters

| Group | Detector type | Tube voltage /kV | Tube current range /mA | Current spacing /mA | Frame rate /(frame /s) |
|-------|---------------------------|---------------------|---------------------------|------------------------|---------------------------|
| 1 | PerkinElmer XRD1621 xN ES | 280 | [0.8, 3.4] | 0.2 | 15 |
| 2 | Varian PaxScan 4030E | 130 | [0.05, 0.6] | 0.05 | 3 |
| 3 | THALES PIXIUM RF4343 | 85 | [0.11, 0.32] | 0.03 | 3 |

每个管电流下采集 50 张曝光图像并取平均值, 得到几款探测器的探元响应随管电流变化曲线如图 3 所示。可以看出, 在设置的各组实验参数下, 探元响应的均值与 X 射线管电流之间均满足良好的线性关系。

在坏点检测效果方面, 图 4~6 分别展示了在不同系统中检测得到的不同探测器的坏点分布, 图中的白色点表示检测到的坏点在探测器上的位置。可以看出不同探测器上都存在着大量坏点, 且分布形式多种多样, 说明该方法对坏点的检测能力并不受坏点分布形式的影响。

为了更直观地观察校正效果, 在表 1 中的 3 组实验参数下, 实验组 1、2、3 分别为在 2.0 mA 的电流下对

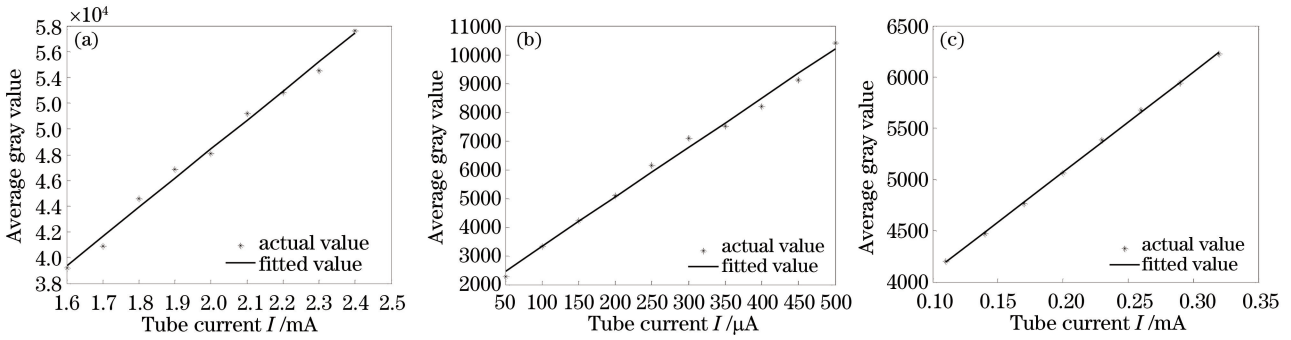


图 3 探元响应随管电流变化关系曲线。(a) PerkinElmer XRD1621 xN ES 探测器；

(b) Varian PaxScan 4030E 探测器；(c) THALES PIXIUM RF4343 探测器

Fig. 3 Response curve change with tube current. (a) PerkinElmer XRD1621 xN ES detector；

(b) Varian PaxScan 4030E detector；(c) THALES PIXIUM RF4343 detector

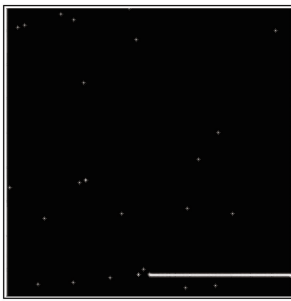


图 4 PerkinElmer XRD1621 xN ES 探测器上的坏点分布

Fig. 4 Distribution of defective pixels on PerkinElmer

XRD1621 xN ES detector

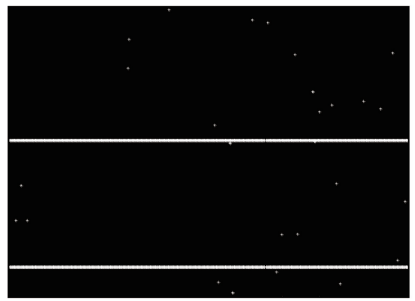


图 5 Varian PaxScan 4030E 探测器上的坏点分布

Fig. 5 Distribution of defective pixels on

Varian PaxScan 4030E detector

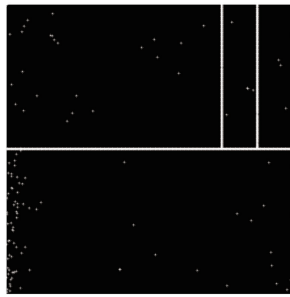


图 6 THALES PIXIUM RF4343 探测器上的坏点分布

Fig. 6 Distribution of defective pixels on THALES PIXIUM RF4343 detector

直径 4 cm 的铝柱进行 CT 扫描、200 μA 的电流下对塑料薄膜进行 CT 扫描以及 230 μA 的电流下对 QRM-MicroCT-SSP 体模中的匀质树脂部分进行 CT 扫描,实验结果如图 7~9 所示。对比图 7~9 中得到的重建结果(a)和结果(b)可以看出,对由响应不一致探元造成的轻微环状伪影和由坏点造成的明显环状伪影均能达到很好的去除效果,相比于传统校正方法,对环状伪影校正更加彻底。另外,图 7、图 8 中传统校正方法对应的重建结果有环状伪影残留,这是因为增益校正对响应严重偏离(2)式的不一致探元校正不彻底。另外,探测器在使用中有新增坏点出现,但未被准确记录在坏点模板中也会导致环状伪影的出现。

为了定量分析校正效果,选择信噪比作为图像质量的评价指标,并用文献[20]中的方法计算图 9(a)和(b)中 3 个区域的信噪比,具体计算公式为

$$R_{\text{SN}} = 20 \lg[\bar{f}(i, j) / \sigma], \quad (9)$$

式中 R_{SN} 表示计算得到的信噪比, $\bar{f}(i, j)$ 与 σ 分别为待评价图像区域的均值和标准差,计算结果如表 2 所

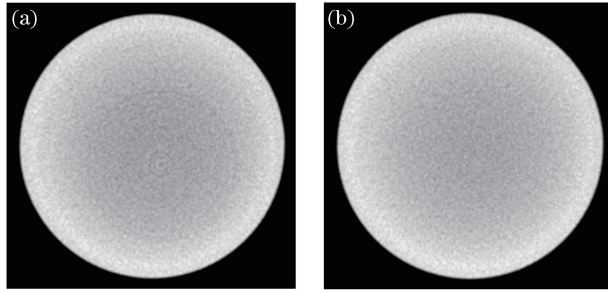


图 7 PerkinElmer XRD1621 xN ES 探测器实验铝柱的重建结果。(a) 传统方法；(b) 本文方法
Fig. 7 Reconstruction results of aluminium column using PerkinElmer XRD1621 xN ES detector.

(a) Traditional method; (b) the proposed method

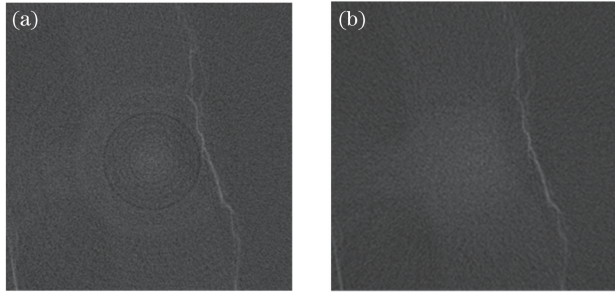


图 8 Varian PaxScan 4030E 探测器实验塑料薄膜的重建结果。(a) 传统方法；(b) 本文方法
Fig. 8 Reconstruction results of plastic film using Varian PaxScan 4030E detector.

(a) Traditional method; (b) the proposed method

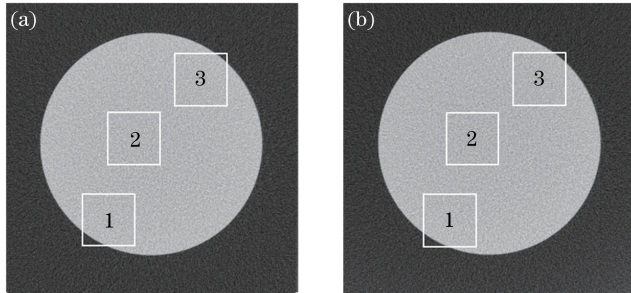


图 9 THALES PIXIUM RF4343 探测器实验 QRM 体模的重建结果。(a) 传统方法；(b) 本文方法
Fig. 9 Reconstruction results of QRM phantom using THALES PIXIUM RF4343 detector.

(a) Traditional method; (b) the proposed method

示。对比 3 个区域的结果可以看出,在环状伪影去除效果相当的情况下本文方法的信噪比更高,进一步验证了其优势。

表 2 两种方法校正后重建图像的信噪比

Table 2 Signal to noise ratio of the reconstructed images after correction by two methods

| | Area 1 | Area 2 | Area 3 |
|-----------|---------|---------|---------|
| Fig. 9(a) | 18.7410 | 18.8739 | 13.5633 |
| Fig. 9(b) | 20.1395 | 20.2117 | 14.7542 |

3 种探测器实验中,在利用相关性分析进行坏点检测时,均未改变阈值,且实现了多种探测器的坏点检测,验证了该方法的适用性。

4 结 论

利用探元响应与 X 射线管电流之间线性相关的特点,将探元进行分类检测和校正,提出一种基于动态

电流的环状伪影去除方法,解决了现有坏点检测方法阈值确定困难的问题。在不同探测器平台上开展实验表明,该方法对环状伪影校正效果较好,通用性较强,且相比于传统方法图像的信噪比得到了提高。

参 考 文 献

- 1 Ma Jiming, Zhang Jianqi, Song Guzhou, *et al.*. Total variation constrained iterative filtered backprojection CT reconstruction method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(2): 0234002.
马继明, 张建奇, 宋顾周, 等. 全变分约束迭代滤波反投影 CT 重建[J]. *光学学报*, 2015, 35(2): 0234002.
- 2 Kyriakou Y, Prell D, Kalender W A. Ring artifact correction for high-resolution micro CT[J]. *Physics in Medicine and Biology*, 2009, 54(17): 385-391.
- 3 Anas E M A, Kim J G, Lee S Y, *et al.*. Comparison of ring artifact removal methods using flat panel detector based CT images[J]. *Biomedical Engineering Online*, 2011, 10(1): 72.
- 4 Mao Lingtao, Fu-pen Chiang, Yuan Zexun. Three-dimensional displacement measurement in solid using digital volumetric speckle photography based on computer tomography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(3): 0312001.
毛灵涛, Fu-pen Chiang, 袁则循. 基于 CT 的数字体散斑法测量物体内部三维变形场[J]. *光学学报*, 2015, 35(3): 0312001.
- 5 Seibert J A, Boone J M, Lindfors K K. Flat-field correction technique for digital detectors[C]. *SPIE*, 1998, 3336: 348-354.
- 6 Zhu Y L, Zhao M L, Li H W, *et al.*. Micro-CT artifacts reduction based on detector random shifting and fast data inpainting[J]. *Medical Physics*, 2013, 40(3): 031114.
- 7 Ashrafuzzaman A N M, Lee S Y, Hasan M K. A self-adaptive approach for the detection and correction of stripes in the sinogram: Suppression of ring artifacts in CT imaging[J]. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2011: 183547.
- 8 Prell D, Kyriakou Y, Kalender W A. Comparison of ring artifact correction methods for flat-detector CT[J]. *Physics in Medicine and Biology*, 2009, 54(12): 3881-3895.
- 9 Sijbers J, Postnov A. Reduction of ring artifacts in high resolution micro-CT reconstructions[J]. *Physics in Medicine and Biology*, 2004, 49(14): 247-254.
- 10 Jha D, Sørensen H O, Dobberschütz S, *et al.*. Adaptive center determination for effective suppression of ring artifacts in tomography images[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(14): 143107.
- 11 Anas E M A, Kim J G, Lee S Y, *et al.*. High-quality 3D correction of ring and radiant artifacts in flat panel detector-based cone beam volume CT imaging[J]. *Physics in Medicine and Biology*, 2011, 56(19): 6495-6519.
- 12 Zhang D H, Ning R L, Chen B, *et al.*. Accurate and efficient calibration method for a selenium flat-panel-detector-based volume tomographic angiography imaging system[C]. *SPIE*, 1999, 3659: 626-636.
- 13 Tang X Y, Ning R L, Yu R F, *et al.*. Cone beam volume CT image artifacts caused by defective cells in X-ray flat panel imagers and the artifact removal using a wavelet-analysis-based algorithm[J]. *Medical Physics*, 2001, 28(5): 812-825.
- 14 Park C J, Lee H K, Song W Y, *et al.*. Defective pixel map creation based on wavelet analysis in digital radiography detectors[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2011, 634(1): 101-105.
- 15 Altunbas C, Lai C J, Zhong Y C, *et al.*. Reduction of ring artifacts in CBCT: Detection and correction of pixel gain variations in flat panel detectors[J]. *Medical Physics*, 2014, 41(9): 091913.
- 16 Blinov N N, Vasilev V N, Gromov G D, *et al.*. Effect of the anode current of an X-ray tube on the intensity and energy spectrum of its radiation[J]. *Biomedical Engineering*, 1984, 18(3): 96-99.
- 17 Wischmann H A, Luijendijk H A, Meulenbrugge H J, *et al.*. Correction of amplifier nonlinearity, offset, gain, temporal artifacts, and defects for flat-panel digital imaging devices[C]. *SPIE*, 2002, 4682: 427-437.
- 18 Chen Jiaoze. Research on characteristics of the photodiode detector in industrial computed tomography[D]. Chongqing: Chongqing University, 2011.
陈教泽. 工业光电二极管探测器特性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- 19 Nelms D W, Shukla H I, Nixon E, *et al.*. Assessment of three dead detector correction methods for cone-beam computed tomography[J]. *Medical Physics*, 2009, 36(10): 4569-4576.
- 20 Zhang Guoqiang, Zhou Hu, He You, *et al.*. Ring artifacts correction of computerized tomography image based on polar-coordinate transform[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(5): 0534001.
张国强, 周 虎, 和 友, 等. 基于极坐标变换去除计算机层析图像环形伪影[J]. *光学学报*, 2012, 32(5): 0534001.