

# 两种 CT 成像环状伪影校正方法

李保磊 杨 民 傅 健 李俊江

(北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100083)

**摘要** 探测器探元响应的不一致性导致计算机层析成像(CT)图像产生环状伪影,使得像质下降,影响了缺陷的判读以及图像的后续处理与量化分析。提出了两种 CT 成像环状伪影校正方法:基于特征识别的校正方法和基于 B 样条曲线拟合的校正方法。前者针对单个独立探元或者少数几个相邻探元存在突出响应不一致的情况。该方法首先识别出响应不一致探元的位置,然后在该位置执行局部中值滤波以消除正弦图中的竖直条纹。后者针对多个连续探元同时存在微小响应不一致的情况。该方法用 B 样条曲线拟合的方法确定各个探元的归一化增益系数,进而对探元的响应不一致性进行校正。两种方法各有特点,互为补充,共同组成较为完备的环状伪影校正体系。实验结果验证了两种方法的有效性。

**关键词** X 射线光学; 计算机层析成像; 环状伪影; 特征识别; B 样条曲线拟合; 正弦图

**中图分类号** TP391 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092907.1849

## Two Ring Artifact Correction Methods for Computed Tomography

Li Baolei Yang Min Fu Jian Li Junjiang

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics  
and Astronautics, Beijing 100083, China)

**Abstract** Ring artifacts in computed tomography (CT) images are introduced by detector element's response nonuniformity. Ring artifact degrades the quality of CT image, influences the determination of defect, and hampers post processing and prohibiting quantitative analysis. Two algorithms for ring artifact correction are proposed based on feature recognition and B-form of the spline curve fitting. The former is for the situation that the response of a single detector element or few continuous detector elements is obviously nonuniform. According to the algorithm, the position of the detector element whose response is nonuniform is determined. And a local median filter is executed at the position to depress the vertical streaking in the sinogram. The latter is for the situation that many continuous detector elements' response has small nonuniformity. In this method, the normalized gain factors of the detector elements are gotten through B-form of the spline curve fitting. So detector element's response nonuniformity can be corrected. The two algorithms have their own characteristics which supply each other and compose together a complete ring artifact correction system. The feasibility of the two methods is validated by the experimental data.

**Key words** X-ray optics; computed tomography; ring artifact; feature recognition; B-form of the spline curve fitting; sinogram

## 1 引 言

环状伪影是计算机层析成像(CT)中的一种典型伪影<sup>[1~4]</sup>,在 CT 图像上表现为以重建中心为圆心的同心圆环或者圆带。反映到投影数据正弦图

上,则表现为竖直方向上的条纹,这些特征条纹和圆环、带,亮度变化或明或暗或明暗交替,宽度变化或宽或窄。环状伪影主要是由像元通道对射线场响应的不一致性引起的。环状伪影降低了 CT 图像质

收稿日期: 2008-06-25; 收到修改稿日期: 2008-11-24

基金项目: 国家自然科学基金(60872080, 50875013)、北京市教育委员会共建项目专项资助航天科技创新基金(CASC0410)和航空科学基金(20070951013)资助课题。

作者简介: 李保磊(1980-),男,博士研究生。主要从事射线 DR、CT 成像,信号、图像处理与识别研究。

Email: baolei\_li@yahoo.com.cn

导师简介: 杨 民(1975-),男,副教授,主要从事 CT 理论与应用研究。E-mail: minyang.ndt@263.net (通信联系人)

量,影响缺陷的判读及图像后续处理和量化分析。去除或最大限度地减少这种伪影是十分必要和关键的。现有文献中已经有很多环状伪影校正方法,如传统的平板探测器线性校正方法<sup>[5]</sup>,此方法固然有效,但是容易产生校正不彻底的情况;Kowalski<sup>[6]</sup>通过对原始投影数据进行高通滤波来提取响应不一致性因子,从原始信号中剔除响应不一致带来的高频信号,抑制环状伪影,但它同时也会过滤掉一些缺陷产生的高频信号,降低系统成像质量;Davis<sup>[7]</sup>通过在投影扫描过程中连续平移射线源或探测器,以不断改变探元和射线的对应关系,使某个探元的响应不一致性的影响平分到整个投影采样序列以减弱该种影响,从而抑制环状伪影,但是该方法实现复杂,且增加了额外硬件开销;Raven<sup>[8]</sup>将投影正弦图进行离散傅里叶变换,利用低通滤波方法滤除水平方向的高频分量;Rivers<sup>[9]</sup>通过在水平方向平滑正弦图来去掉垂直方向的线状伪迹;Matani<sup>[10]</sup>通过采用迭代滤波的图像处理方法去掉环状伪影。这些校正方法对环状伪影有不错的抑制效果,但是校正不彻底,容易带来新的伪影,且易引起空间分辨率的降低。张全红<sup>[11]</sup>提出了基于响应不一致性的预处理校正法和基于坐标变换的后处理校正法。前者缺乏其理论合理性,而后者又由于在极坐标变换中涉及到插值运算,降低了图像空间分辨率。为了有效消除环状伪影,且不引起空间分辨率的下降,本文提出了两种 CT 成像环状伪影校正方法:基于特征识别的环状伪影校正和基于 B 样条曲线拟合的环状伪影校正,来分别抑制不同类型的环状伪影。

## 2 基于特征识别的环状伪影校正

### 2.1 算法原理与步骤

首先在正弦图中识别出引起环状伪影的垂直条纹所在的位置,即找到不一致性探元所在的位置。然后在局部进行低通滤波,消除垂直条纹,进而消除环状伪影,且保持 CT 图像的空间分辨率。

图 1 给出了该校正算法的流程,具体实现过程描述如下:

1) 设置滤波算子

$$\mathbf{h} = \begin{pmatrix} 1 & -2 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

对正弦图  $\mathbf{P}(\beta, s)$  进行滤波。得到  $\mathbf{P}_h(\beta, s) = \mathbf{P}(\beta, s)$

$\otimes \mathbf{h}$ 。 $\mathbf{h}$  为执行算子,算子大小为  $3 \times H$ 。 $H$  为设定参数。 $\beta, s$  分别为投影角度和投影地址坐标。

2) 滤波后的正弦图各行求平均,

$$\bar{P}(s) = \left| \frac{1}{M} \sum_i^M \mathbf{P}_h(\beta_i, s) \right|, \quad (2)$$

$M$  为角度采样数。

3) 计算出  $\bar{P}(s)$  的最大值为  $\bar{P}_{\max}$ , 设定一个阈值参数  $c, 0 < c \leq 1$ , 若有:

$$\begin{aligned} \bar{P}(s_i) > c\bar{P}_{\max}, [\bar{P}(s_i) - \bar{P}(s_{i-1})] \geq 0, \\ [\bar{P}(s_{i+1}) - \bar{P}(s_i)] \leq 0, i = 1, 2, \dots, N, \end{aligned} \quad (3)$$

则位置  $i$  为正弦图中垂直条纹所在坐标,即导致环状伪影产生的响应不一致探元的位置。(3) 式中,  $N$  为探测器的宽度(像素数)。

4) 对正弦图的每行数据,在以位置  $i$  为中心的  $K$  像素邻域内执行中值滤波,消除垂直条纹。得到校正后的正弦图  $\tilde{\mathbf{P}}(\beta, s)$ 。

5) 对正弦图  $\tilde{\mathbf{P}}(\beta, s)$  滤波反投影重建得到消除了环状伪影的 CT 图像。

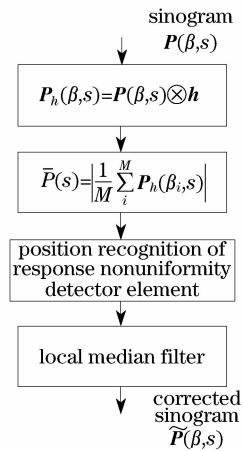


图 1 基于特征识别的环状伪影校正流程

Fig. 1 Flow chart of ring artifact correction based on feature recognition

上述算法中执行算子  $\mathbf{h}$  滤波是为了增强正弦图中的垂直条纹以便于识别,  $H$  是考虑到噪声对识别结果的影响而设置的参数,使得算子  $\mathbf{h}$  具有抑制噪声的作用。  $H$  设置越大,则算子抑制噪声的能力越强。可以根据投影正弦图的噪声水平调整  $H$  的大小。经算子滤波后的正弦图,垂直条纹得到增强,各行求平均以后,在垂直条纹处的信号强度较其他位置要大,形成一个信号峰值,这为后续的特征识别奠定了基础。参数  $c$  的设置是考虑到 CT 图像中的环状伪影不止一处的情况,多个不一致性探元,会引起多个环状伪影。而且伪影的强度可能不完全相同,参数  $c$  设置得较小时,就可以把那些强度较弱的环状

伪影识别出来,相反  $c$  设置得比较大时,只能识别强度较大的环状伪影。 $c$  的选择依据 CT 图像中的伪影分布状况而定。另外,经研究发现,可以经过多次执行算子滤波,提高不一致性识别能力。

## 2.2 实验验证

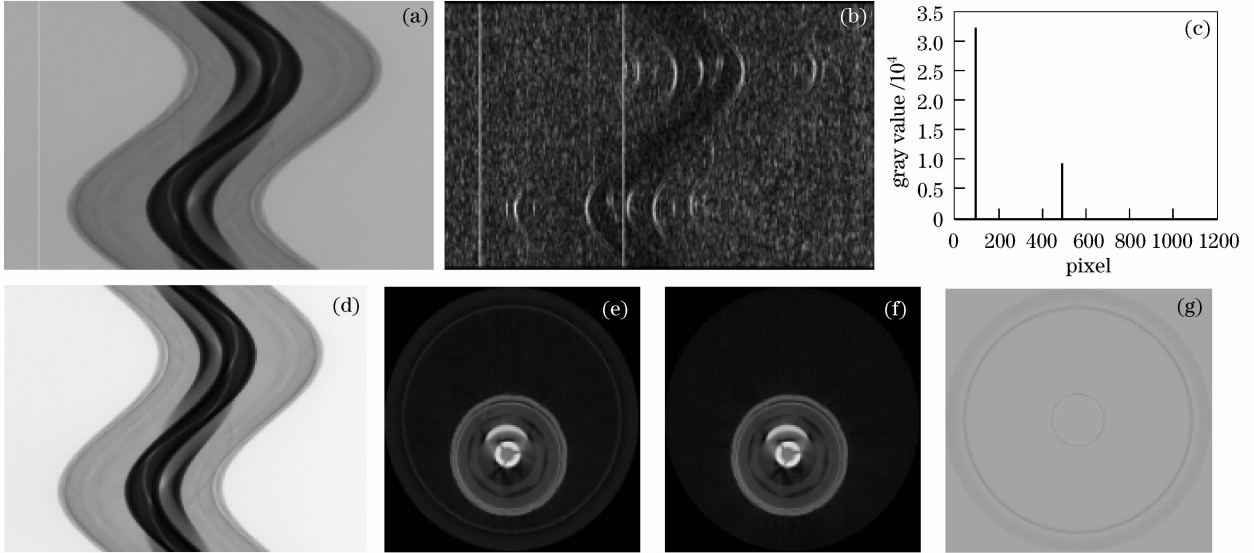


图 2 基于特征识别的环状伪影校正。(a)原始正弦图,(b)经执行算子  $h$  滤波后的正弦图,(c)  $\bar{P}(s)$  分布的灰色曲线,(d) 去除竖直线纹后的正弦图,(e)原始 CT 图像,(f)校正后的 CT 图像,(g) CT 图像校正前后的中差图像

Fig. 2 Ring artifact correction for CT image based on feature recognition. (a) original sinogram, (b) sinogram filtered by operator  $h$ , (c) the gray curve distribution of  $\bar{P}(s)$ , (d) sinogram after eliminating vertical streaking, (e) original CT image, (f) corrected CT image, (g) difference image between original CT image and corrected CT image

可见,经上述算法校正,环状伪影得到抑制,而且没有损失空间分辨率,因为图 2(g)中差图像中不包含原图像的任何细节信息。由于本算法只在正弦图的局部区域进行中值滤波,而其余部分的数据并未作任何处理,因此相对现有的校正方法,可以最大限度地保持图像的空间分辨率,这是本算法的优越之处。

但是本算法亦有不足之处,它只能识别校正单个独立探元或者少数几个相邻探元同时存在突出不一致性的情况。对于后者,只需要增大中值滤波窗口尺寸  $K$  即可。然而,本算法对于很多个连续探元同时存在微小不一致性误差的情况校正效果欠佳,此时特征不易被成功识别。

## 3 基于 B 样条曲线拟合的环状伪影校正

### 3.1 算法原理与步骤

对于二维扇束 CT 成像,设探测器有  $N$  个探元,增益因子分别为  $h(i)$ ,  $i=1,2,3\cdots N$ 。CT 扫描一周采样  $M$  个角度。在每个角度下都产生一行投

实验条件:XS-225D 微焦点射线源,管电压 160 kV,管电流  $100 \mu\text{A}$ ,放大比  $M=8$ ,焦距 1000 mm。对圆珠笔进行 CT 扫描。实验结果如图 2 所示。

影值。

$$p(m,n) = h(n)f(m,n), \\ n = 1,2\cdots N; m = 1,2,\cdots M, \quad (4)$$

$p(m,n)$ 即为探测器采集到的投影正弦图, $f(m,n)$ 为理想投影正弦图。每行代表某一固定视角下不同探元采集到的投影数据,每列代表某一固定探元采集的不同视角下的同一射线对应的投影数据,故某个探元的响应不一致性只会影响正弦图相应一列的数据。在正弦图上表现为竖直的条纹,该列数据相对于相邻几列数据会呈现较为明显的数值变化,在同一行数据中表现为高频成份。

基于上述分析,可以将正弦图所有行叠加平均,得到一行数据。若不存在探元响应不一致性,此行数据会非常光滑,因为即使某个视角下的投影存在高频信息,随着投影视角的改变,此高频信息在投影正弦图每行数据上的坐标位置会随之改变,当  $M$  行数据叠加平均后,此高频信息也将得到抑制;若存在探元响应不一致性,由于它只反映在投影正弦图某一固定列上,叠加平均后,高频信息会依然存在;叠加结果中的高频成份反映了探元响应的不一致性。

B样条函数拟合逼近作为一种分段多项式逼近方法,不但能够保证拟合的曲线充分逼近实验数据,且能保证拟合曲线的光滑性<sup>[12]</sup>。所以可以对  $M$  行数据叠加平均后的一行数据进行 B 样条曲线拟合,拟合的曲线认为是探测器的理想响应。依据理想响应和实际采集到的投影数据,就可以估计出各个探元的增益因子。进而可以对各个探元进行不一致性校正。校正流程如图 3 所示。该方法实现步骤如下:

1) 将正弦图  $p(m, n)$  所有行叠加平均得到一行数据  $\bar{p}(n)$ , 即

$$\bar{p}(n) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M p(m, n). \quad (5)$$

2) 对  $\bar{p}(n)$  进行 B 样条曲线拟合得到相对光滑曲线  $\bar{p}_B(n)$ ;

3) 假定  $\bar{p}_B(n)$  为理想投影, 求解增益因子

$$h(n) = \bar{p}(n) / \bar{p}_B(n). \quad (6)$$

4)  $p(m, n)$  的各列都除以  $h(n)$  以抑制响应不一致性, 得到校正后的正弦图, 即

$$\tilde{p}(m, n) = p(m, n) / h(n), m = 1, 2, \dots, M. \quad (7)$$

算法中涉及到的设定参数为用样条函数进行最小二乘拟合时的阶数。

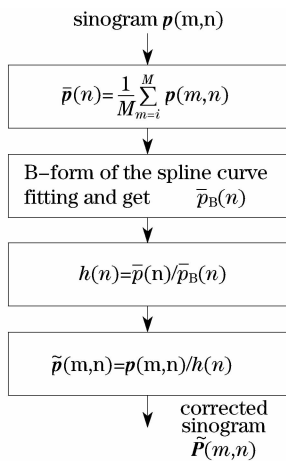


图 3 基于 B 样条曲线拟合的环状伪影校正流程

Fig. 3 Flow chart of ring artifact correction for CT image based on B-form of the spline curve fitting

### 3.2 实验验证

实验条件: 0.2 mm 焦点射线源, 管电压 160 kV, 管电流 0.2 mA, 放大比  $M = 3$ 。焦距 850 mm。对分辨率卡进行 CT 扫描。实验结果如图 4 所示。

显见, 经上述算法校正, 环状伪影得到了有效地抑制, 且分辨率并未降低。但是该方法对于单个独立探元响应有突变的情形, 校正效果欠佳, 因为利用

B 样条对于有突变的信号进行曲线拟合, 拟合效果欠佳。所以本算法与基于特征识别的环状伪影抑制方法各有特点, 互相补充, 且不能取代对方。

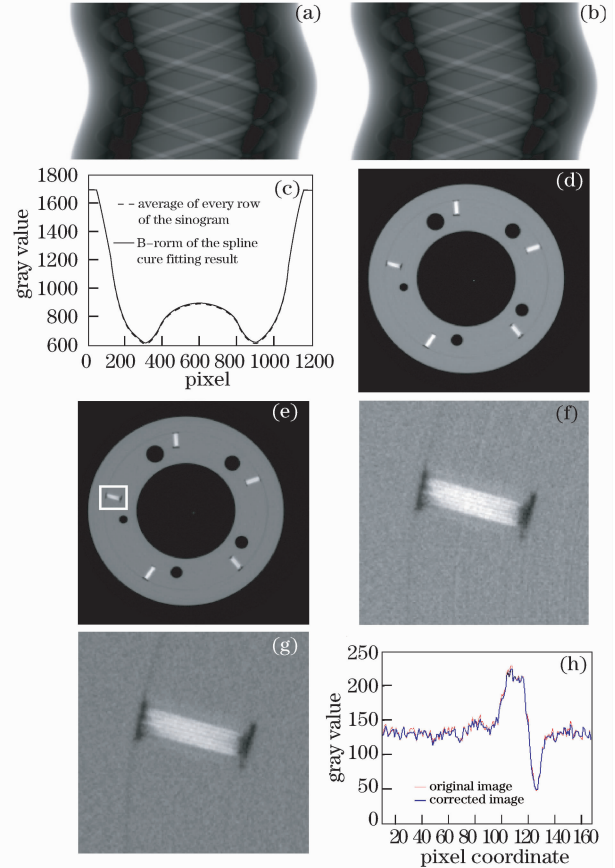


图 4 基于 B 样条曲线拟合的环状伪影校正。(a) 原始正弦图, (b) 校正后正弦图, (c)  $\bar{p}(n)$  和  $\bar{p}_B(n)$  比较曲线, (d) 原始 CT 图像, (e) 校正后 CT 图像, (f) 校正前的局部图像 [图 4(d) 中的正方形], (g) 校正后的局部图像 [图 4(e) 中的正方形], (h) 图 4(f) 与图 4(g) 中某些行曲线对比

Fig. 4 Ring artifact correction for CT image based on B-form of the spline curve fitting. (a) original sinogram, (b) corrected sinogram, (c) the comparison between  $\bar{p}(n)$  and  $\bar{p}_B(n)$ , (d) original CT image, (e) corrected CT image, (f) local image before correction [see square in Fig. 4(d)], (g) local image after correction [see square in Fig. 4(e)], (h) gray curve comparison of certain row in Fig. 4(f) and Fig. 4(g)

而采用文献[9]中的方法对上述正弦图进行校正得到的局部对比图像如图 5 所示。显而易见图中的线对细节已不可分辨, 即空间分辨率有所下降。且环状伪影的校正也不够彻底。由此可见本文算法的优越性。

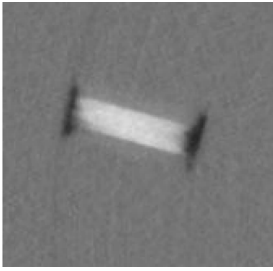


图 5 局部对比图像

Fig. 5 Local comparison image

## 4 结 论

本文提出了两种环状伪影校正方法,基于特征识别的校正方法和基于 B 样条曲线拟合的校正方法。两种方法各有特点,互为补充,共同组成较为完备的环状伪影校正体系。实验结果验证了两算法的有效性。

## 参 考 文 献

- 1 Fang Zheng, Sun Xiaomin, Luo Qingming. New simple method of X-ray beam hardening correction for CT reconstruction[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 302~306  
方正,孙小敏,骆清铭. 一种简便的计算机层析系统 X 射线硬化校正方法[J]. *光学光报*, 2007, **27**(2): 302~306
- 2 Chen Xin, Sun Yi, Zhu Peiping. Reconstruction algorithm of cone-beam phase X-ray computer-tomography based on grating imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 4801~4801  
陈欣,孙怡,朱佩平. 光栅成像的锥束相位 CT 重建算法[J]. *光学光报*, 2008, **28**(6): 4801~4801
- 3 Jiang Shiping, Li Meifang, Chen Yang *et al.*. In-line X-ray phase-contrast computerized tomography [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 609~621  
蒋诗平,李妹芳,陈阳等. 同轴 X 射线相位衬度计算机 X 射线断层摄影术研究[J]. *光学光报*, 2008, **28**(3): 609~621
- 4 Gao Hongyi, Xie Honglan, Chen Jianwen *et al.*. Experimental research on hard X-ray phase-contrast imaging [J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(2): 167~169  
高鸿奕,谢红兰,陈建文等. 硬 X 射线相位衬度成像的实验研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(2): 167~169
- 5 Varian Medical Systems. PaxScan Flat Panel Imagers 2520 4030A Communications Manual[M]. North Charleston: Varian Medical Systems, 2004: 64~65
- 6 G. Kowalski. Suppression of ring artifacts in CT fan-beam scanners[J]. *IEEE Trans on Nucl Sci*, 1978, **25**(5): 1111~1116
- 7 G. R. Davis, J. C. Elliott. X-ray microtomography scanner using time-delay integration for elimination of ring artifacts in the reconstructed image [J]. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 1997, **394**(1~2): 157~162
- 8 C. Raven. Numerical removal of ring artifacts in microtomography[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1998, **69**(8): 2978~2980
- 9 M. Rivers. Tutorial introduction to X-ray computed microtomography data processing[EB/OL]. Chicago, University of Chicago, 1998. <http://www-fp.mcs.anl.gov/xray-cmt/rivers/tutorial.html>
- 10 A. Mantani, K. Terakawa. Artifact reduction filtering method for CT images [C]. *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Proceedings, Piscataway*, 2002, **2**: 1035~1036
- 11 Zhang Quanhong. *Optimization Research on X-ray Industrial CT Imaging*[D]. Beijing: Beihang University, 2006  
张全红. X 射线工业 CT 成像优化研究[D]. 北京:北京航空航天大学, 2006
- 12 Yan Qingjin. *Numerical analysis*[M] Beijing: Beihang University Press, 2000, 207~219  
颜庆津. 数值分析[M]北京:北京航空航天大学出版社, 2000, 207~219