

基于极坐标变换去除计算机层析图像环形伪影

张国强^{1,2} 周 虎³ 和 友¹ 刘慧强^{1,2} 王玉丹^{1,2} 薛艳玲¹ 谢红兰¹ 肖体乔¹

¹ 中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201800;
² 中国科学院研究生院, 北京 100049
³ 中国科学院南京土壤研究所, 江苏 南京 201008

摘要 探测器像元响应的不一致、光源能不稳定等因素使得计算机层析(CT)图像中含有较多的环形伪影,严重降低了图像质量,影响了图像的三维重建和量化分析,为此提出了基于极坐标变换与傅里叶变换后低通滤波的算法去除环形伪影。通过极坐标变换将直角坐标下的环形伪影转化为极坐标下的线性伪影,然后对线性伪影图像进行傅里叶变换获得频谱图像,进而设计二维低通滤波器进行滤波处理,最后通过傅里叶逆变换与坐标逆变换获得校正后的图像。利用 Matlab 软件,编写程序对算法进行验证,结果表明,该算法能够有效地去除环形伪影,使图像内部细节清晰可见,并且保护了图像边缘信息,提高了图像的信噪比;另外,使用该方法处理 100 张切片图像只需 3.5 min,可满足批量处理的需求。

关键词 X 射线光学; 环形伪影; 线性伪影; 极坐标变换; 傅里叶变换

中图分类号 TP391; O434.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0534001

Ring Artifacts Correction of Computerized Tomography Image Based on Polar-Coordinate Transform

Zhang Guoqiang^{1,2} Zhou Hu³ He You¹ Liu Huiqiang^{1,2}
Wang Yudan^{1,2} Xue Yanling¹ Xie Honglan¹ Xiao Tiqiao¹

¹ Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
³ Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210008, China

Abstract Ring artifacts in computerized tomography (CT) images are introduced by the nonuniform response of the detector elements and the instabilities of light source, which greatly influence three-dimensional reconstruction and quantitative analysis. A correction algorithm based on polar-coordinate transform and Fourier transform is proposed. Through polar coordinate transform, ring artifacts are transformed to line artifacts. Then, Fourier transform is applied to the line artifacts image. Furthermore, the frequency-domain filtering processing by a two-dimensional low-pass filter is taken. The corrected image is got by the inverse transform process of both Fourier and coordinates. Experiments are carried out by Matlab software, the result indicates that the proposed algorithm not only eliminates the ring artifacts effectively, but also keeps the image edges and increases the signal-to-noise ratio (SNR). In addition, the correction speed proves that it can be applied for batch processing.

Key words X-ray optics; ring artifacts; line artifacts; polar-coordinate transform; Fourier transform

OCIS codes 340.6720; 340.7440; 100.2000

收稿日期: 2011-11-16; 收到修改稿日期: 2011-11-28

基金项目: 国家 973 计划(2010CB834301)和国家自然科学基金(10805071,10705020,11105213,31100680)资助课题。

作者简介: 张国强(1986—),男,硕士研究生,主要从事环形伪影去除算法方面的研究。

E-mail: zhangguoqiang1986@sinap.ac.cn

导师简介: 肖体乔(1966—),男,研究员,博士生导师,主要从事 X 射线光学、成像光学及光学检测等方面的研究。

E-mail: tiqiaoxiao@sinap.ac.cn(通信联系人)

1 引言

环状伪影是计算机层析(CT)图像中一种常见的伪影,反映在投影正弦图上为竖直方向上的直线,在CT图像上反映为以重建中心为圆心的同心圆^[1~4]。主要由于探测器像元对射线响应不理想引起的^[5,6],包括探测器像元的缺陷,像元对射线强度响应的非线性,像元之间对射线强度响应的不一致性,像元对射线能谱响应的非线性等。另外,光源不稳定、射束硬化和重建过程中滤波器函数也会导致环状伪影的产生^[7]。环状伪影在很大程度上降低了图像质量,严重影响了图像的后续处理,如噪声处理、识别与分割、三维重建及量化分析等,在医学领域还会直接影响医生的诊断的正确性,因此去除或最大程度地减少这种伪影是十分必要的。

目前,环状伪影的校正方法已经很多。Sijbers等^[8]通过对极坐标图像进行单向平滑与一致性行检测确定伪影模版向量消除环状伪影;夏雄军等^[9]采用单向平滑算子以及以图像减影为基础的自适应平滑方法,提高了伪影处理的精确性和适应性;Raven^[10]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了水平方向的高频分量;余晓镔等^[11]利用多尺度小波或 Hough 变换分析来查找正弦线状伪影的位置,并对该位置上的数据进行插值处理;Rivers^[12]通过在水平方向平滑正弦图来去掉竖直方向的线状伪迹;李保磊等^[13]提出对单个独立像元存在突出响应不一致导致的环状伪影可利用基于特征识别的方法找到投影正弦图的条状伪影位置。王珏等^[14]采用 S-L 滤波器对原始投影数据进行滤波,采用线积分,并利用差分处理增大伪影和正常图像差异,最后通过线性插值和线性外推对环状伪影处投影数据进行校正,提高了信噪比。

以上校正方法都有一定的校正效果,但也都存在一些不足。基于投影正弦图的校正方法虽在质量上优越一些,但仍存在局限性,如相关参数不易确定,计算过于复杂,迭代算法的子集或子集处理顺序、所校正的时间相对较长;对于复杂的投影正弦图,阈值不易选择,无法查找伪影位置,以致校正不彻底;极坐标变换法需经过两次坐标变换及插值处理,使得图像分辨率有所下降,使用的滤波器需要针对各个不同的图像设定不同的环状伪影阈值和皮肤边缘阈值,并且如果这两个阈值不能同时设定妥当,很容易将非伪影的像素误认为伪影。

针对这些方法的不足,本文提出了基于极坐标

变换的一种新的环状伪影校正算法。该算法先确定环状伪影中心位置、采样间隔与采样点数,将环状伪影转化为线性伪影;对线性伪影图像进行傅里叶变换,设计二维低通滤波器以去除线性伪影的高频成分;最后通过对滤波后的频谱进行傅里叶逆变换与坐标逆变换获得校正后的图像。结果表明,该算法能够有效快速地去掉环状伪影,提高图像的信噪比,并可满足批量处理的需求。

2 环状伪影去除方法及原理

2.1 直角坐标系变换为极坐标系

2.1.1 确定环状伪影中心与采样间隔

采用 Image-ProPlus6.0 软件读取包含环状伪影的待处理图像 $f(x, y)$,将 $f(x, y)$ 放大(放大至 800%)以确定环状伪影中心 $C(X, Y)$ 。此方法可精确地获取环状伪影中心。为了保留初始图像的所有信息,计算环状伪影中心与图像 $f(x, y)$ 四个顶点的距离,取其最大值作为极坐标转换半径 R ,转换角度可以取 π 或 2π 。为了尽量降低坐标变换对图像分辨率的影响,必须尽量减小径向和角度方向的采样间隔。在图像 $f(x, y)$ 中,若像元间距为 $\Delta x = \Delta y$,可以取 $\Delta r = \Delta x, \Delta\theta = \Delta r/m(m \geq 2)$ 。

2.1.2 极坐标变换与插值

用 $p(r, \theta)$ 表示极坐标图像,转换角度取 180° ,横向坐标 r 范围取 $(-R, R)$,纵向坐标范围取 $\pi/1080 \sim \pi$,此时 $\Delta r = 1, \Delta\theta = \pi/1080$ 。当 r 为负值时,由于

$$\begin{cases} r\sin\theta = -r\sin(\theta + 180^\circ) \\ r\cos\theta = -r\cos(\theta + 180^\circ) \end{cases} \quad (1)$$

故转换角度取 180° 等效于转换角度取 360° 的情况。为了保证转换是以环状伪影中心为原点,在确定极坐标图像各点象素值的时候,不直接变换原图像,而是先按

$$\begin{cases} x = r\cos\theta + X \\ y = r\sin\theta + Y \end{cases} \quad (2)$$

将极坐标映射到直角坐标,并通过 Matlab 软件里的最近邻插值函数,即

$$\begin{cases} x = \text{round } x \\ y = \text{round } y \end{cases} \quad (3)$$

确定极坐标图像各点的像素值。经过极坐标变换后,原直角坐标系下的环状伪影(如图 1 所示)在极坐标系中表现为与 θ 轴相互平行的线性伪影(如图 2 所示)。

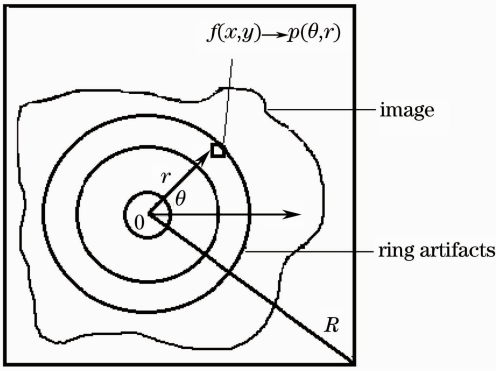


图 1 环形伪影图像示意图

Fig. 1 Image with ring artifacts

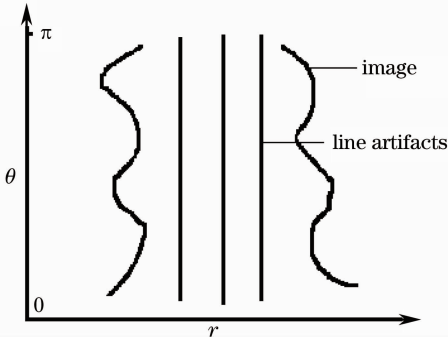


图 2 转换后的极坐标图像示意图

Fig. 2 Image after polar coordinate transformation

2.2 傅里叶变换与低通滤波

为了表征极坐标图像 $p(r, \theta)$ 中灰度变化的剧烈程度,以确定线性伪影并进行滤波处理,需要对 $p(r, \theta)$ 进行二维傅里叶变换以获得其频谱 $F(u, v)$,大小为 $M \times N$ 。由于 $p(r, \theta)$ 中竖直方向的线性伪影处的像素点只在水平方向上有剧烈的灰度变化,所以其梯度方向垂直于线性伪影的方向;将 $F(u, v)$ 中心从矩阵的原点移到矩阵的中心后,线性伪影的频谱表现为只在通过中心点的水平方向上存在亮点,这些亮点对应于 $p(r, \theta)$ 中灰度变化剧烈的点,即对应于线性伪影。

设计二维低通滤波器 H ,大小为 $M \times N$,如图 3 所示,其中 W 为狭缝的宽度, L 为狭缝的高度,黑色

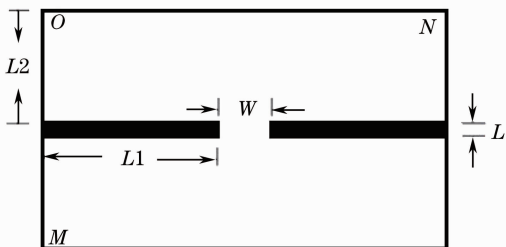


图 3 二维低通滤波器 H

Fig. 3 Two-dimensional low-pass filters H

区域值取 0,白色区域值取 1。为了在频谱图像中心的水平方向上实现低通滤波,要求狭缝的水平位置 $L1$ 取 $(N - W)/2$ 的整数值,垂直方向位置 $L2$ 取 $M/2$ 的整数值^[15],以确保狭缝的中心与滤波器 H 的中心 H_c 保持一致。 W 与 L 均为非固定值,可根据情况选择,如果环形伪影的宽度不大,取 $L \leq 3$,同时为了保持图像自身的边缘及内部细节等高频信息, W 可取 40 ~ 100,定义“ $*$ ”为将矩阵相同位置元素相乘,乘积在原位组成新的矩阵的运算,可得

$$F'(u, v) = F(u, v) * H_c, \quad (4)$$

得到滤波后的频谱图像 $F'(u, v)$;通过傅里叶逆变换即可得到校正后的极坐标图像 $p'(r, \theta)$ 。

2.3 极坐标系变换为直角坐标系

按照公式

$$\begin{cases} r = \sqrt{x^2 + y^2} \\ \theta = \arctan(y/x) \end{cases}, \quad (5)$$

将极坐标图像 $p'(r, \theta)$ 反变换到直角坐标系下,得到校正后的图像 $f(x, y)$ 。

校正算法流程图如图 4 所示。

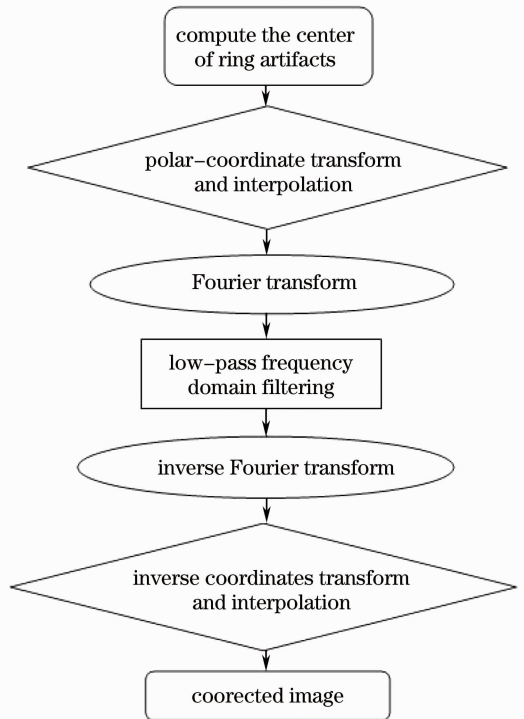


图 4 环形伪影校正算法流程图

Fig. 4 Flow chart of the ring-artifact correction algorithm

3 实验结果与分析

实验平台的配置如表 1 所示。

表 1 实验平台配置

Tabel 1 Experimental platform configuration

CPU	Intel i5-750
Memory	KingSton DDR3 4 GB
Operation system	Windows 7 ultimate SP1 X64

采用 Matlab7. 8. 0(R2009a) 软件编写程序, 转换角度取 π , 采样间隔 $\Delta r=1, \Delta \theta=\pi/1080$, 滤波器参数取 $W=80, L=3$ 。实验样品图像是某药片的原始重建图像, 如图 5 所示, 箭头所指位置存在较多的环形伪影, 严重影响了图像的质量。

图 6 给出了该药片图像极坐标变换后的线性伪影图像及其对应的傅里叶频谱图像。从图 6(a) 箭头指向位置可以清晰地看到经过坐标变换后环形伪影变为线性伪影; 图 6(b) 的频谱图像验证了线性伪影经傅里叶变换与移频处理后在经过频谱中心的水平方向上存在亮点, 同时也证明了在此方向上进行

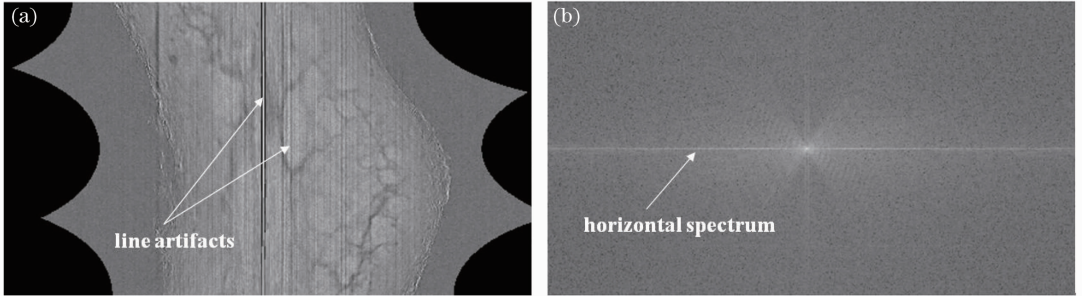


图 6 极坐标变换图像与其频谱图像。(a)极坐标变换图像; (b)傅里叶频谱图像

Fig. 6 Image through polar-coordinate transform and its spectrum image. (a) Image of tablet through polar-coordinate transform; (b) spectrum image

图 7 给出了经本文算法校正后药片图像。与

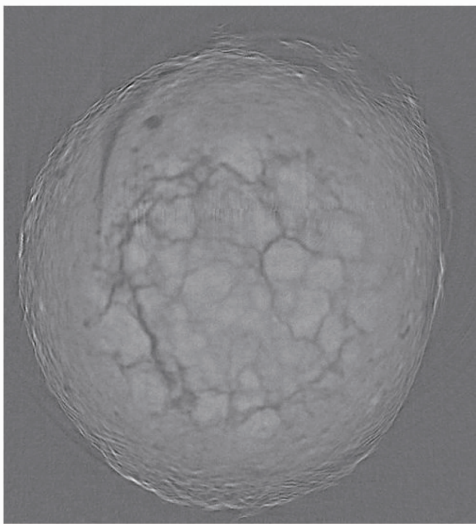


图 7 校正处理后的药片图像

Fig. 7 Images of tablet after correction using the suggested method

低通滤波的正确性。

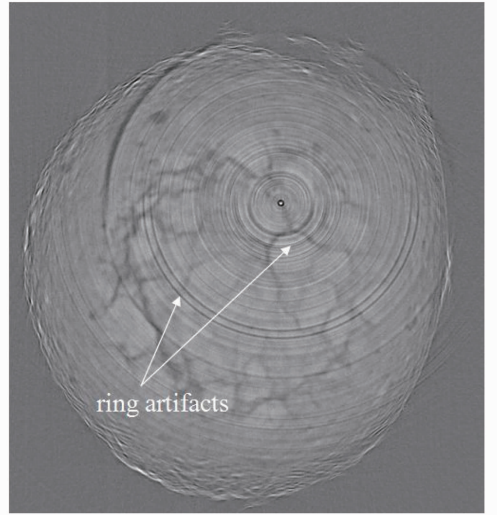


图 5 包含环形伪影的原始药片图像

Fig. 5 Original tablet images with ring artifacts

图 5 中的原始图像比较可知, 环形伪影均得到彻底的消除。

图 8(a) 为某化石的原始重建图像, 由中国科学院古脊椎动物与古人类研究所张弥曼院士提供。图 8(b) 为采用本文算法校正后的图像。对比两图可知, 原始图像中的环形伪影同样得到了比较彻底的校正。

为了更直观地考察校正算法的效果, 图 9(a)~(f) 给出了校正前后的局部图像, 其中图 9(b)、9(e) 是采用文献[5]中单向自适应平滑算法校正的结果。对比图 9 所示的两组图像可知, 相对于单向自适应平滑算法, 频域低通滤波校正算法不但彻底地消除了环形伪影, 更重要的是, 校正后的图像内部细节清晰地展现出来(如箭头所示), 且图像边缘保存完整, 图像空间分辨率受到的影响很少。

在实际工程应用中, 通常采用信噪比 (SNR) R_{SN} 作为图像质量的评价指标^[14], 其公式为

$$R_{SN} = 20 \lg \left[\frac{\bar{f}(i, j)}{\sigma} \right], \quad (6)$$

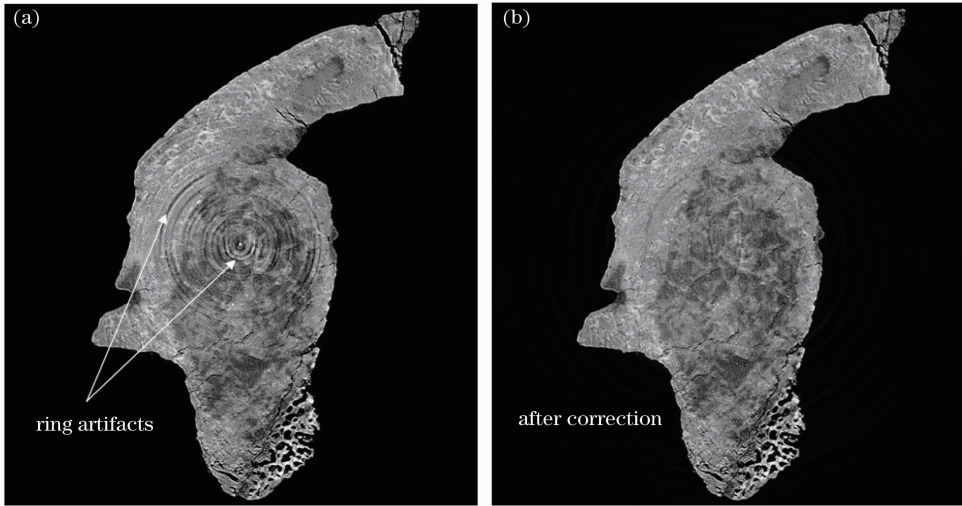


图 8 校正前与校正后的化石图像。(a)校正前图像;(b)校正后图像

Fig. 8 Fossil images before and after correction. (a) Before correction; (b) after correction

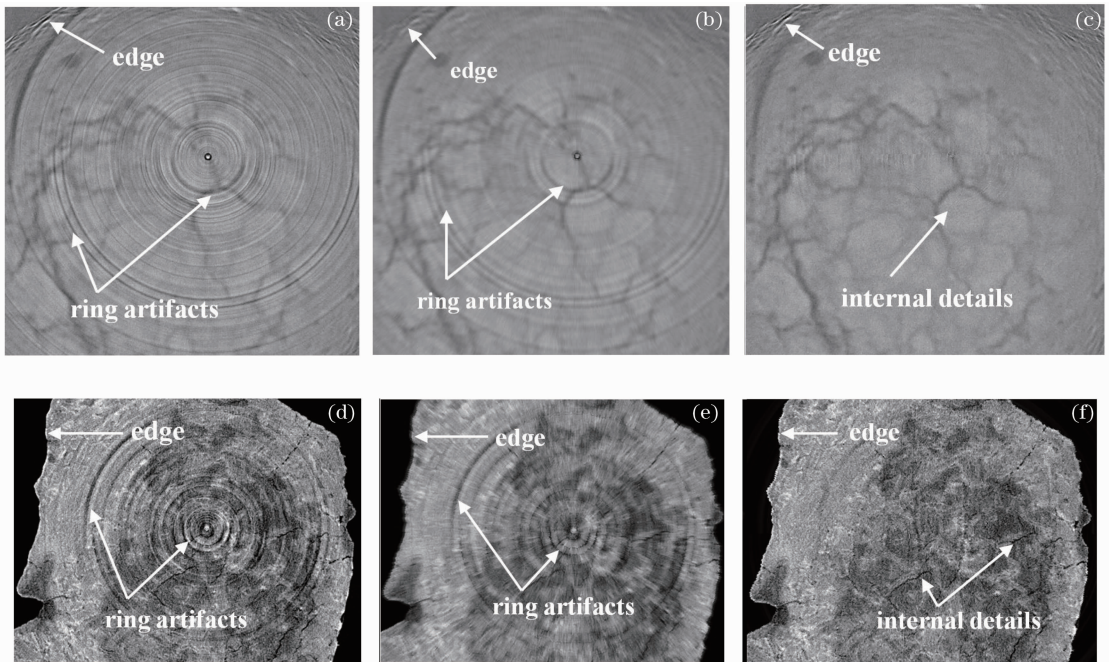


图 9 不同算法校正效果对比。(a)校正前药片局部图像;(b)自适应平滑噪声算法校正;(c)频域低通滤波算法校正;

(d)校正前化石局部图像;(e)自适应平滑噪声算法校正;(f)频域低通滤波算法校正

Fig. 9 Correction-effect contrast by different algorithms. (a) Before local image of tablet; (b) by adaptive smoothing noise algorithm; (c) low-pass frequency-domain filtering algorithm; (d) local image of fossil; (e) adaptive smoothing noise algorithm; (f) low-pass frequency-domain filtering algorithm

式中 $\bar{f}(i, j)$ 和 σ 分别为被评价图像的均值与标准差, 计算图 9(a)~(f) 的 SNR, 如表 2 所示。

表 2 校正前后图像的信噪比与效果对比

Table 2 SNR and effect contrast of ring artifacts images before and after correction

	Before correction	Adaptive noise processing		Low pass frequency domain filtering		
SNR	Fig. 9 (a)	17. 8790	Fib. (b)	20. 3469	Fig. (c)	19. 1052
	Fig. 9(b)	5. 6692	Fig. (e)	6. 7732	Fig. (f)	5. 9823
Contrast	Lots of ring artifacts, image quality is significantly influenced	Incomplete correction, unclear edge and internal details		Complete correction, clear edge and internal details		

从表 2 可以看出,两种算法都提高了图像的信噪比,且自适应平滑噪声算法校正的信噪比增益较大,主要原因是后者在校正中进行了平滑运算,这也是其导致校正后图像分辨率降低,边缘损失严重的最主要因素。本文校正算法之所以有效,是因为将环形伪影变换为线性伪影,傅里叶变换及在过频谱中心点的水平方向低通滤波都是针对线性伪影的高频成分,不涉及到样品图像成分,所以校正环形伪影的同时,也保护了图像内部及边缘细节,提高了信噪比。

鉴于一般 CT 实验数据量较大,含有环形伪影的切片图像较多,本文进行了批处理校正实验。实验结果表明,处理 100 张环形伪影切片图像用时约 3.5 min,可满足批量处理的要求。

4 结 论

提出了对极坐标变换后的线性伪影图像进行傅里叶变换,并设计二维低通滤波器对频谱图像滤波处理,最后通过傅里叶逆变换与坐标逆变换的方法去除环形伪影。利用 Matlab 编写了程序,并对算法进行了验证,验证结果表明该方法不仅能最大程度地消除环形伪影,清晰地呈现图像内部细节,而且保护了图像边缘,提高了图像的信噪比,且校正速度较快,处理 100 张切片仅需 3.5 min 左右,可很好地满足批处理的需求。

参 考 文 献

- 1 J. H. Kinney, Q. C. Johnson, M. C. Nichols *et al.*. X-ray microtomography on beamline X at SSRL [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1989, **60**(7): 2471~2474
 - 2 Yiannis Kyriakou, Daniel Prell, Willi A Kalender. Ring artifact correction for high-resolution micro CT[J]. *Phys. Med. Biol.*, 2009, **54**: 385~391
 - 3 Jiang Shiping, Li Meifang, Chen Yang *et al.*. In-line X-ray phase contrast computerized tomography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 609~612
- 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]. *光学学报*, 2008, **28**(3): 609~612

- 4 Gao Hongyi, Xie Honglan, Chen Jianwen *et al.*. Experimental research on hard X-ray phase-contrast imaging[J]. *Chinese 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 Li Junjiang, Hu Shaoxing, Li Baolei *et al.*. Ring artifact correction for industrial CT images[J]. *J. Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2007, **33**(11): 1378~1382
- 李俊江,胡少兴,李保磊等. CT 图像环状伪影校正方法[J]. *北京航空航天大学学报*, 2007, **33**(11): 1378~1382
- 6 M. A. Yousof, M. Asaduzzaman. An efficient ring artifact reduction method based on projection data for micro-CT images [J]. *J. Sci. Res.*, 2010, **2**(1): 37~45
- 7 Fu Jian, Lu Hongnian. A correction method for ring artifact s in fan X-ray industrial computerized tomography [J]. *Opt. & Precision Engng.*, 2002, **10**(6): 542~546
- 傅 健,路宏年. 扇束 X 射线 ICT 中环状伪影的一种校正方法 [J]. *光学精密工程*, 2002, **10**(6): 542~546
- 8 J. Sijbers, A. Postnov. Reduction of ring artifacts in high resolution micro-CT reconstructions [J]. *Phys. Med. Biol.*, 2004, **49**(14): 247~253
- 9 Xia Xiongjun. Reduction of Radiation Image Noise and CT Ring Artifacts[D]. Beijing: Tsinghua University, 2007. 38~46
- 夏雄军. 辐射图像噪声及 CT 环形伪影消除[D]. 北京:清华大学, 2007. 38~46
- 10 C. Raven. Numerical removal of ring artifacts in micro tomography [J]. *Rev. Sci. Inst.*, 1998, **69**(8): 2978~2980
- 11 Yu Xiaoe, Luo Junfang, Chen Wufan. Ring artifact correction of CT images based on sinogram[J]. *J. th Fourth Military Medical University*, 2009, **30**(3): 207~209
- 余晓镔,罗君芳,陈武凡. 基于弦图的 CT 图像环形伪影校正 [J]. *第四军医大学学报*, 2009, **30**(3): 207~209
- 12 M. Rivers. Tutorial introduction to X-ray computed micro tomography data processing [EB/O L]. Chicago: University of Chicago, 1998
- 13 Li Baolei, Yang Min, Fu Jian *et al.*. Two ring artifact correction methods for computed tomography [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7): 1849~1853
- 李保磊,杨 民,傅 健等. 两种 CT 成像环状伪影校正方法 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(7): 1849~1853
- 14 Wang Jue, Huang Suhong, Cai Yufang. Ring artifact correction for CT images [J]. *Opt. & Precision Engng.*, 2010, **18**(5): 1126~1132
- 王 珏,黄苏红,蔡玉芳. 工业 CT 图像环形伪影校正[J]. *光学精密工程*, 2010, **18**(5): 1126~1132
- 15 R. C. Gonzalez, R. E. Woods, S. L. Eddings. Digital Image Processing Using Matlab[M]. Ruan Qiuping Transl.. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006. 78~88
- R. C. Gonzalez, R. E. Woods, S. L. Eddings. 数字图像处理 (Matlab 版)[M]. 阮秋琦译. 北京:电子工业出版社, 2006. 78~88

栏目编辑:李文誌