

文章编号 1004 924X(2002)06 0542 05

扇束 X 射线 ICT 中环状伪影的一种校正方法

傅 健, 路宏年

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100083)

摘要: 在扇束 X 射线 ICT 系统中, 由于探测器响应不一致性, 在重构图像上会引起环状伪影。为解决这个问题, 提出了一类可以抑制探测器响应不一致性, 从而能消除环状伪影的扫描采样方式; 归纳、分析了这类扫描方式所必须满足的一个条件。计算机模拟和实验证明, 在满足这个条件的扫描采样方式下, 具有响应不一致性的探测器获取的投影数据无须任何额外的处理, 即可使用相应的滤波反投影重构算法, 重构出环状伪影显著减弱的图像。

关键词: 计算机层析成像; 射线检测; 环状伪影; 响应不一致

中图分类号: TP391.41 **文献标识码:** A

1 引言

工业计算机层析成像(Industrial Computed Tomography, ICT)作为一种融合了射线光电子学、精密机械和计算机科学新型非接触式测试技术, 以其射线扫描、重构得到的高分辨率图像, 可对各种工业构件内部形位尺寸进行精密无损计量。

工业 CT 探测器由数百到上千个排列成线阵的探测通道构成。该探测阵列的响应一致性(表征探测器各通道性能的一致性)对 CT 图像质量影响很大。扇束工业 CT 一般采用滤波反投影算法(Filtered Back Projection Algorithm, FBP)^[1-3]进行图像重构, 它假设探测器各通道之间的性能是一致的, 但实际很难做到, 为此在重构图像之前, 需要对投影数据进行校正。

探测器响应不一致性问题自 CT 技术出现以来, 就一直得到深入的研究, 也得到了不少有效的校正方法, 但都有其局限性。如 Kowalski^[4,6]通过对原始投影数据进行高通滤波来提取响应不一致因子, 从而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。Jiang Hsieh^[7]通过对探测器每一通道逐一标定来

抑制环状伪影, 这种方法对探测通道少的 CT 系统是有效的, 但对于探测通道较多时, 就显得比较困难了。Davis, Elliott^[8]等人进行了通过改变探测器通道积分时间来减弱环状伪影的研究, 这种方法需要对每个通道进行控制, 显然在通道数量多时, 也是困难的。文献[9-11]通过平均各通道响应因子来减小环状伪影, 这种方法削弱了没有响应不一致性问题的通道的性能, 从而降低整个系统的成像质量。

分析上述方法可见, 它们均是对已具有响应不一致性的投影数据进行的一种后处理技术。不同于这种技术路线, 本文从投影数据的采集环节入手, 提出了一类可以抑制探测器响应不一致性的扫描采样方式。

2 滤波反投影算法及环状伪影形成

滤波反投影重构算法实质是, 找出被重构点在滤波后的所有视角下的一维投影中的投影地址, 然后将投影地址内的值反投影回去, 进行求和平均, 得到的值即为重构点的射线衰减系数。

设 $a(r, \theta)$ 为极坐标形式的待重构断层, 由文献[3], 在图 1 所示扫描布局下, 有如下扇束重构公式:

收稿日期: 2002-04-15; 修订日期: 2002-10-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 6017201)

$$a(r, \theta) = \int_0^{2\pi} \frac{1}{U^2} P^e(S1, \beta) d\beta, \quad (1)$$

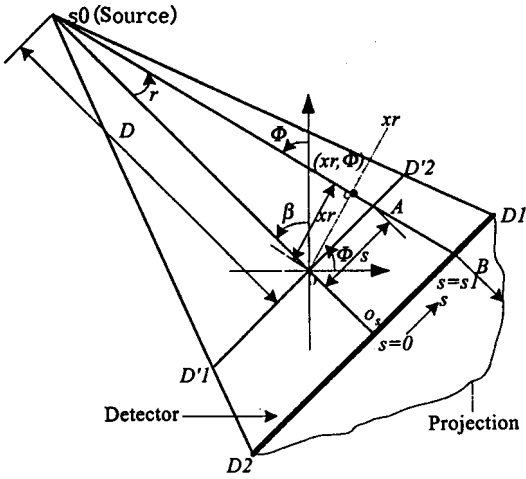


图 1 扇束重构公式参数图

Fig. 1 Parameters for fan_beam reconstruction formula.

其中, $U = \frac{D + r \sin(\beta - \theta)}{D}$ 为加权因子; $P(s, \beta)$ 为扇束投影; $P^e(S, \beta) = P(S, \beta) \cdot \frac{D}{\sqrt{D^2 + S^2}}$ 为加权等效投影; $g(S) = \frac{1}{2} h(S)$ 为滤波函数; $P^e(S, \beta) = P^e(S, \beta) \times g(S)$ 为滤波后投影; $S1 = \frac{Dr \cos(\beta - \theta)}{D + r \sin(\beta - \theta)}$ 为待重建点位置。

当探测器各通道有响应不一致性时, 投影数据根据(1)式进行反投影运算, 将在重构图像上产生环状伪影。由于加权、平均的反投影算子的点扩展函数为 $1/r$, 故反投影算子的实质是实际物体与一个模糊函数 $1/r$ 的卷积, 所以发生响应不一致性的探测器通道越靠近投影中心, 环状伪影越严重。图 2 给出了这种伪影的计算机模拟。模拟条件如下(单位: 个像素):

- 探测器个数: 360; 投影视图数: 360;
- 焦尺距: 800; 不一致响应因子: 1.01;
- 发生响应不一致性探测器位置: 40, 10(距投影中心距离); 模拟模型: 圆, 中心(0, 0), 半径 45, 线性衰减系数 1000;

图 2(a) 为响应一致的探测器获取的滤波后的投影数据图, (d) 为其相应的重构图像; (b) 为发生响应不一致的探测器通道距离投影中心 10 个像素的探测器获取的滤波后的投影数据图, (e) 为其相应的重构图像; (c) 为发生响应不一致的探测

通道距离投影中心 40 个像素的探测器获取的滤波后的投影数据图, (f) 为其相应的重构图像; (g) 为 e, f 图像第 180 行对应的灰度曲线。可以明显的看到, 发生响应不一致的探测器通道距离投影中心越近, 反投影重构产生的环状伪影幅度越大。

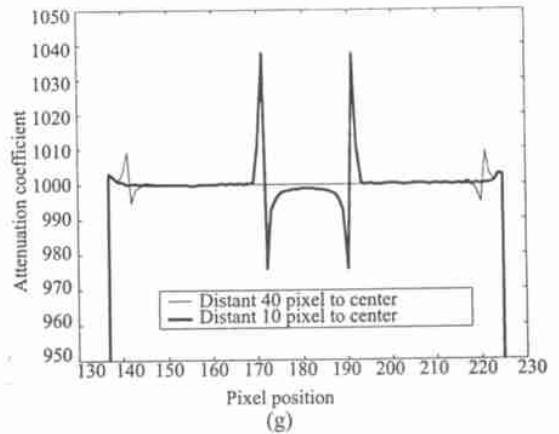
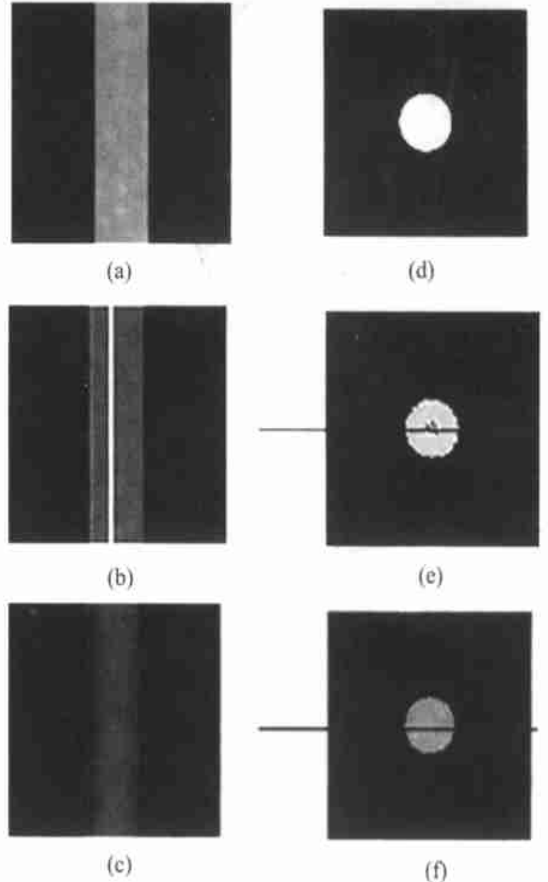
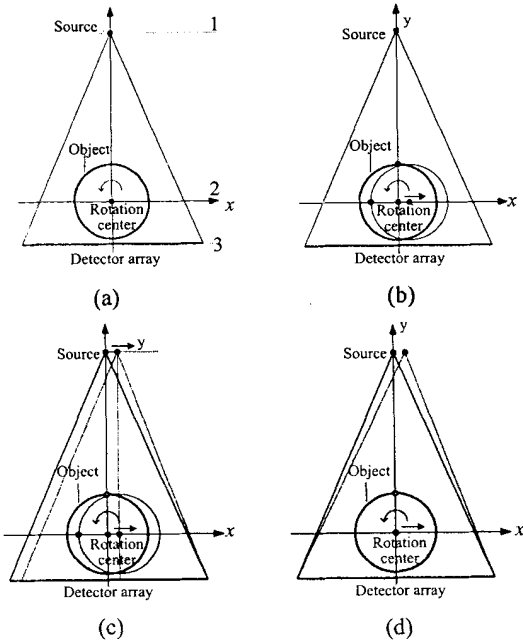


图 2 由探测器响应不一致性引起的环状伪影计算机模拟(图像线性拉伸显示)

Fig. 2 Computer simulation of ring artifacts caused by the non_uniform response of detectors (displayed by linear transfer).

3 抑制环状伪影的扫描采样方式

具有响应不一致性的探测器通道之所以会影响重构图像,产生环状伪影,关键是其在扫描过程中始终采集同一根射线受被检物质调制后携带的信号。这样反投影时,该探测器通道具有的响应不一致性通过这些信号在重构矩阵固定位置形成以这根射线为切线,以旋转中心为中心的环。所以,如果能在扫描过程当中,采用一定的扫描方式,使具有响应不一致性的通道能采集不同射线携带的信号,在原始投影采集环节即将探测器系统响应不一致性平均分布到整个采样序列,避免其集中在投影序列的固定位置,那么这种环状伪影可以得到抑制。



(a) 标准扇束第三代扫描方式,只物体旋转;(b)物体在旋转的同时平移的扫描方式;(c)物体在旋转的同时与射线源同步平移的扫描方式;(d)射线源沿轨迹 1 平移,而物体和探测器不动的扫描方式。

(a) Only objects rotate; (b) Objects rotate and transverse simultaneously; (c) Objects rotate and transverse with the source simultaneously; (d) The source transverses along track 1 and objects and detectors stay.

图 3 扫描方式示意图

Fig. 3 Scan mode schemes.

据此思想,提出了如图 3 所示的几种可能的扫描采样方式。下文讨论的射线源、探测器、物体的运动分别指它们在如图 3(a) 所示的轨迹 1、2、3 上的匀速平移运动。

4 计算机仿真及分析

在对图 3 所示扫描方式减弱环状伪影的效果进行计算机模拟时,由于图 3(b) 和 (d) 方式采集的投影,其等效旋转中心在采样过程中发生了变化,所以需要推导相应的重构算法。这里采用文献[12]提出的旋转中心随旋转角度线性变化时的重构算法。图 3(c) 投影经过处理后,仍满足如公式(1)所示的经典滤波反投影算法的要求,故仍采用它。图 4 给出了这几种扫描方式对应的重构结果。扫描、重构条件如下(单位:个像素):

探测器个数: 360; 投影视图数: 360; 焦距距: 800;

响应不一致性: 各通道响应不一致性因子控制在 $[0.99, 1.01]$, 随机分布; 模拟模型: 圆, 中心 $(0, 0)$, 半径 45, 线性衰减系数 1000;

图 3(b) 扫描方式: 扫描过程中, 物体平移 96;

图 3(c) 扫描方式: 扫描过程中, 物体和射线源平移 96;

图 4(a)、(e) 为采用标准扇束第三代扫描时, 对应的投影正弦图和重构图像, 可以明显的看到, 由探测器通道随机分布的响应不一致因子引起的环状伪影。图 4(b)、(f) 为采用图 3(b) 所示扫描方式时, 对应的投影正弦图和重构图像, 可以看到, 环状伪影是消失了, 但产生了其它伪影, 这说明并未校正探测器通道响应不一致带来的问题。图 4(c)、(g) 为采用图 3(c) 所示扫描方式时, 对应的投影正弦图和重构图像, 显然, 环状伪影极大减弱。图 4(i) 所示的图 4(e)、(f)、(g) 对应部分灰度曲线表明: 图 3(b) 扫描方式抑制环状伪影没有效果, 它只是将探测器响应不一致引起的环状伪影变换了一种形式, 这是由于采用的算法不同产生的, 图 3(c) 扫描方式能有效抑制环状伪影。

图 3(a)、(b) 所示的采样扫描方式之所以不能抑制环状伪影, 就是因为它们并没有改变探测器通道与射线的对应关系, 在整个扫描采样过程中, 每个探测器通道只采集同一根射线调制的信号。而图 3(c) 所示扫描采样方式正是在扫描采

样过程中改变了探测器通道与射线的对应关系, 所以可以抑制环状伪影。

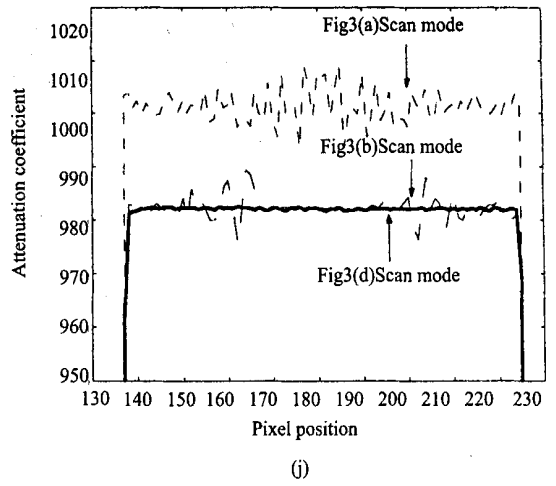
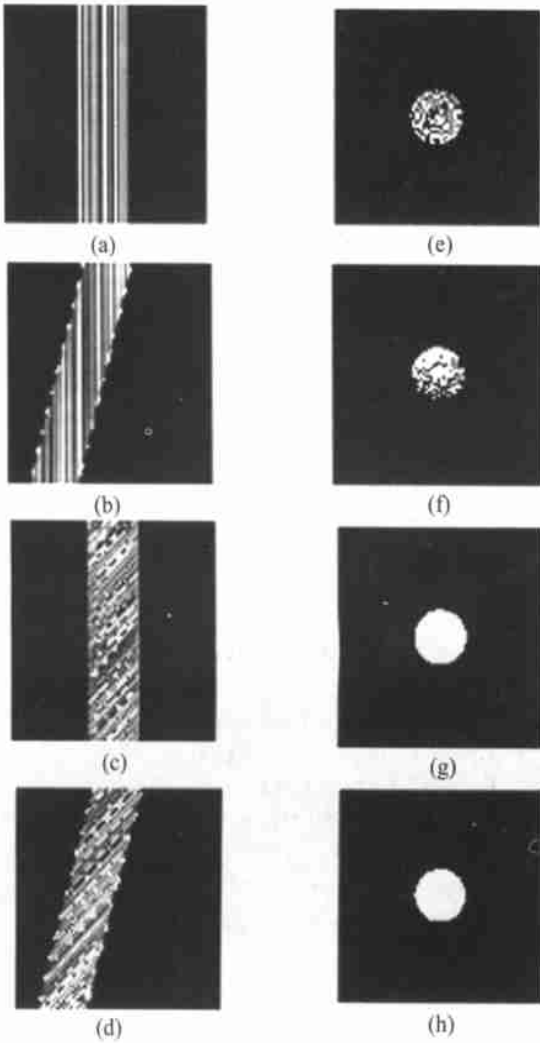


图 4 各扫描采样方式抑制环状伪影的计算机仿真图 (图像对比度拉伸显示)

Fig. 4 Computer simulation results of the effect of scan modes to reduce ring artifacts (displayed by contrast transfer).

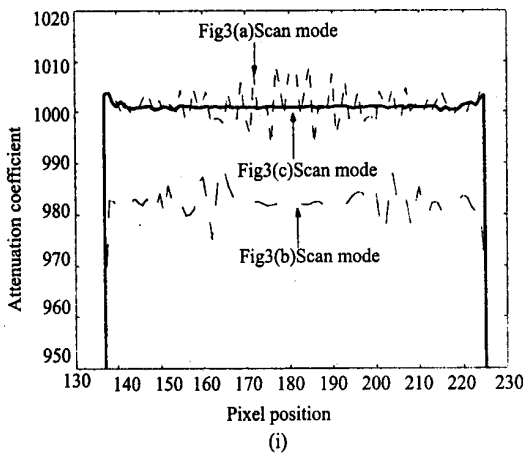
考查改变了射线与探测器通道的对应关系的图 3 (d) 方式。根据上述结论, 它应该能抑制环状伪影。图 4 (d)、(h) 为图 3 (d) 扫描方式对应的投影正弦图和重构图像。图 4 (h) 所示的重构结果和 (j) 所示的灰度曲线证明了这个推论。

5 实验

在 BHCT_320/350 工业 CT 系统上, 以有机玻璃试件为被检件对本文所提扫描方式抑制环状伪影的效果进行了实验验证。图 5 (a) 为采用图 3 (a) 标准三代扫描方式获得的重构图象, 图 5 (b) 为采用图 3 (d) 所示扫描方式获得的重构图象。可以明显看出, 该种扫描方式有效抑制了环状伪影。

6 结论

射线源、被检物体、探测器三者沿如图 3 (a) 所示的相互平行的轨迹 1、2、3 匀速平移运动, 有 8 种可能的运动方式^[13]。由分析可知, 其中有四种运动方式是图 3 所示四种运动方式的对偶。所以, 上述分析包括了所有的运动方式。这说明, 必须能够在扫描采样过程中改变探测器通道与射线



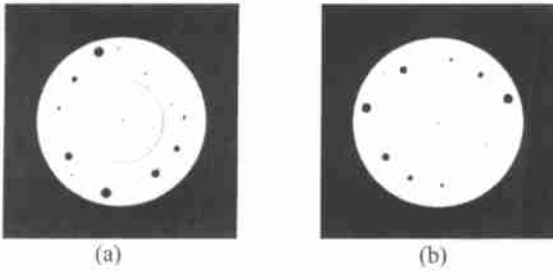


图 5 环状伪影抑制前后图像

Fig. 5 Reconstructed images before and after corrected.

的对应关系确实是所有以抑制环状伪影为目的的扫描方式必须满足的一个必要条件。

本文讨论中,将射线源、被检物体、探测器的运动限制为轨迹 1、2、3 上的匀速平移运动。如果三者采用满足上述必要条件的其他的轨迹和运动方式,将产生其他的有效的抑制环状伪影的扫描方式。

参考文献:

- [1] Horn B K P. Fan_Beam Reconstruction Methods[J]. *IEEE*, 1979, 67: 1616_1623.
- [2] Herman G T. *Image reconstruction from projection: the fundamentals of computed tomography* [M]. New York: Academic Press, 1980.
- [3] 庄天戈. CT 原理与算法[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1992. 68_71.
- [4] Kowalski G. Suppression of ring artifacts in CT fan_beam scanners[J]. *IEEE Trans On Nucl Sci*, 1978, NS 25(5): 1111_1116.
- [5] 王峰, 徐朝银, 潘国强, 等. 同步辐射 x 射线双晶单色仪能量扫描[J]. *光学 精密工程*, 2001, 9(4): 401_404.
- [6] 金春水, 王占山, 曹建林. 软 X 射线投影光刻原理装置的设计[J]. *光学 精密工程*, 2000, 8(1): 66_70.
- [7] Jiang Hesieh. Reconstruction Bias Resulting from Weighted Projection and Iso_center Misalignment [J]. *SPIE*, 1999, 3661: 442_449.
- [8] Davis G R, Elliott J C. X-ray Microtomography Scanner Using Time_delay Integration For Elimination of Ring Artifacts in the Reconstructed Image[J]. *Nucl. Instr. And Meth. in Phys. Res. A*, 1998, 402: 683_687.
- [9] 张丕状, 路宏年. 面阵 CCD 微光像感器图像的校正[J]. *兵工学报*, 2000, 21(4): 361_364.
- [10] 王召巴. 成像系统响应的不一致性对重建图像质量的影响[J]. *光学技术*, 2001, 27(2): 100_102.
- [11] 庞彦伟, 王召巴. CT 图像环形伪迹分析[J]. *华北工学院学报*, 2001, 22(1): 16_19.
- [12] 傅健, 路宏年. 旋转中心随旋转角度变化的一类扇束重构算法[J]. *航空制造技术*, 已录用.
- [13] 尼启良, 陈波, 巩岩, 等. 激光等离子体软 X 射线光源的一种诊断方法[J]. *光学 精密工程*, 2002, 10(3): 235_238.

Correcting method for ring artifacts in fan_beam X-ray ICT

FU Jian, LU Hong_nian

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

Abstract: In a fan_beam X-ray ICT system, the non_uniform response of the detecting system could cause ring artifacts in image reconstruction. In order to mitigate this situation, a class of scan sampling patterns was proposed, which could suppress the non_uniform response and consequently decrease the ring artifacts. A condition, which this class of scan patterns must meet, is discussed. Computer simulation and experimental results show that the reconstruction of image with few ring artifacts, and without any other special disposal, could be generated with a filtered back_projection algorithm using those data sampled by the detecting system with non_uniform response under this kind of scan pattern.

Key words: computed tomography; penetrating radiation tests; ring artifacts; non_uniform response

作者简介: 傅 健(1976), 男, 四川泸州人, 博士生。