

文章编号:1000-8055(2013)05-0971-06

一种用于 CT 空间分辨率增强的 图像重建方法

傅 健¹, 谭忍泊¹, 赵 峰²

(1. 北京航空航天大学 机械工程及自动化学院
数字辐射成像与生物医学成像实验室, 北京 100191;
2. 内蒙古红峡化工厂, 呼和浩特 010010)

摘 要: 为在既有硬件条件下提高工业计算机层析成像(computed tomography, CT)系统空间分辨率, 分析了提高采样频率的半像素错位工业 CT 扫描方法, 提出了一种基于代数迭代技术的直接重建算法, 以面积权值对采集到的投影数据进行交替迭代, 实现高分辨率图像重建. 利用星型空间分辨率模型开展了计算机仿真分析, 重建图像截止频率处的调制度达到 0.8, 表明了该方法提高空间分辨率的潜力. 标准空间分辨率测试卡工业 CT 扫描重建实验结果进一步验证了其可行性和有效性. 该方法简单、易行, 在工业 CT 系统中有良好工程应用前景.

关 键 词: 工业计算机层析成像; 空间分辨率; 半像素错位扫描; 重建算法; 代数迭代重建
中图分类号: V21; TP391 **文献标志码:** A

An image reconstruction method for improving CT spatial resolution

FU Jian¹, TAN Ren-bo¹, ZHAO Feng²

(1. Digital Radiation Imaging and Biomedical Imaging Laboratory,
School of Mechanical Engineering and Automation,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;
2. Hongxia Chemical Plant in Inner Mongolia, Hohhot 010010, China)

Abstract: In order to improve the spatial resolution of industrial computed tomography (CT) without changing the hardware, the half-pixel offset scanning mode was analyzed and a direct reconstruction algorithm, which was based on the algebraic iteration technique, was proposed. This algorithm adopted area-weight to execute directly the iterative update of the reconstructed value using the acquired projection data. Computer simulation analysis with a star-type spatial resolution phantom was implemented and a modulation of 0.8 was reached at the cut-off frequency. It demonstrates that the proposed method has the potential of improving the spatial resolution. The industrial CT experimental results of a standard spatial resolution phantom validate the feasibility and the effect of the method. The proposed approach is easy to implement and has a promising application future.

收稿日期:2012-05-28

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20130508.0949.201305.971_002.html

基金项目: 国家自然科学基金(11179009, 50875013); 北京市自然科学基金(4102036); 北京市科技新星计划(2009A09)

作者简介: 傅健(1976—), 男, 四川自贡人, 副教授, 博士, 主要研究方向为多维信息探测、成像和可视化方法.

Key words: industrial computed tomography; spatial resolution; half-pixel offset scanning; reconstruction algorithm; algebraic iteration reconstruction

计算机层析成像(computed tomography, CT)是一种先进的非接触式测试技术^[1-7],广泛应用于发动机叶片、涡轮盘等航空航天领域关键零部件的无损检测^[8-9]. 考虑硬件和算法的成熟性,目前广泛采用的工业 CT 是基于仅物体回转的 3 代扫描扇束 CT.

空间分辨率是工业 CT 系统鉴别和区分微小缺陷能力的量度,主要依赖于射线源焦点尺寸、探测器探元大小、成像几何结构等硬件因素. 为在现有硬件条件下提高 3 代扇束 CT 空间分辨率,可以考虑采用提高采样频率的扫描方式和相应的重建算法. 目前,提高采样频率的扫描方式主要有 3 种:①探测器中心偏置 1/4 像素扫描技术^[10];②射线源焦点摆动法^[11];③像素错位技术^[12-13]. 其中,射线源焦点摆动法需要采用特殊的 X 射线发生器,较难在工程中应用. 探测器中心偏置 1/4 像素扫描技术和像素错位技术是同一类方法,只是后续数据处理方法不同. 考虑工程实现的方便性,像素错位法更易在工业 CT 系统中应用.

针对像素错位扫描方式,提出了很多数据处理和重建算法^[12-13]. 它们一般都包括数据预处理和重建两步:将实际大探元探测器获得的数据处理为虚拟小探元探测器对应的投影值;再利用传统 CT 算法进行重建. 其中,文献^[12]提出的数据预处理方法的假定前提条件,使得处理后的虚拟探测器投影数据是方程组的病态解. 而文献^[13]中利用同时代数重建技术(simultaneous algebraic reconstruction technique, SART)求得虚拟探测器对应数据,得到的是方程组的近似解,无法保证投影信息的完整和准确.

针对上述问题,本文在对半像素错位 CT 扫描方法进行分析基础上,提出了一种基于代数迭代技术的直接重建算法,以面积权值对采集到的数据进行交替迭代,实现高分辨率图像重建. 该方法直接对数据进行位置排序重建,并不进行数据预处理,保证了投影数据完整性. 空间分辨率模型的计算机仿真和实验结果验证了该方法的可行性和有效性. 实验测定的调制传递函数(modulation transfer function, MTF)曲线定量表明重建图像的空间分辨率较传统方法有较大提升. 该方法简单、易行,在工业 CT 系统中有良好的应用前景.

1 扫描方式

半像素错位法的基本思想是:正常采集完第 1 组投影数据后,探测器平移半个探元宽度的距离,采集第 2 组数据,如图 1. 这样,正常采样的投影数据和偏移半像素的投影数据在位置上有半个像素的重叠,两组数据比普通一次采样数据包含更多的图像信息. 那么,运用相应的数据处理和重建算法就可以得到更高分辨率的图像.

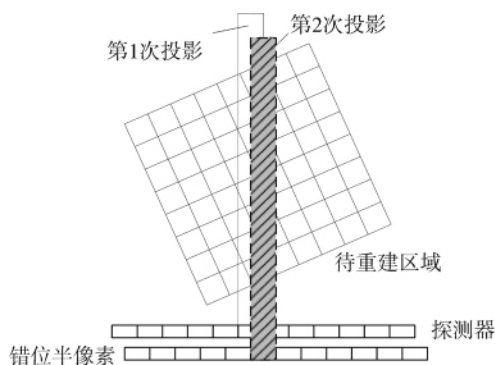


图 1 半像素错位法采样示意图

Fig. 1 Schematic of half-pixel offset sampling

2 重建算法

针对图 1 半像素错位扫描方式,我们提出了以代数迭代技术^[14]为基础的直接重建算法,如式(1)所示. 图 2 为该算法的实现流程,其中 N 为射线总数.

$$\begin{cases} f^{(0)} = 0 \\ f^{(k+1)} = f^{(k)} + \lambda^{(k)} \frac{p_j - c_j^T f^{(k)}}{\|c_j\|^2} c_j & k \text{ 为偶数 } j = k/2 \\ f^{(k+1)} = f^{(k)} + \lambda^{(k)} \frac{p'_j - c'_j{}^T f^{(k)}}{\|c'_j\|^2} c'_j & k \text{ 为奇数 } j = (k-1)/2 \end{cases} \quad (1)$$

式中 $f^{(k)}$ 表示第 k 次重建的图像; c_j 表示第 1 组扫描的加权权值矩阵; c'_j 表示第 2 组扫描的加权权值矩阵; p_j 表示第 1 组扫描第 j 条射线的投影值; p'_j 表示第 2 组扫描第 j 条射线的投影值; $\lambda^{(k)}$ 表示第 k 次迭代的收敛系数.

图 1 的扫描方式会产生两组投影数据矩阵: P 和 P' . 前一组中的每一根射线投影 p_j 与后一组

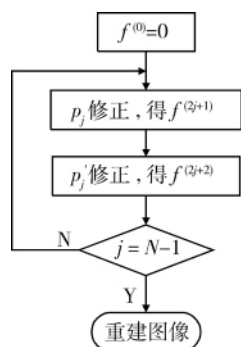
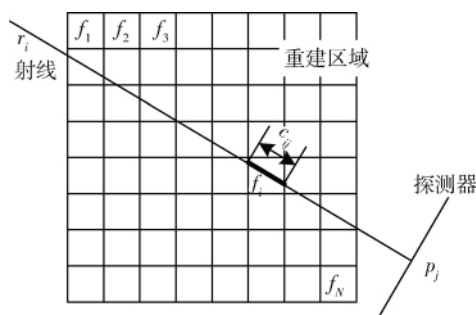


图2 直接重建算法流程图

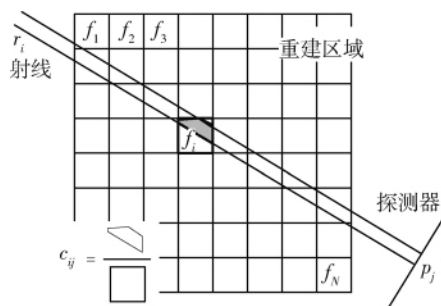
Fig. 2 Flow chart of direct reconstruction algorithm

中的同一编号的投影 p'_j 有半个像素的相叠. 由图2算法进行图像重建时, 其基本思想如下: 每次迭代的顺序总是先以投影值为 p_j 的射线修正图像, 接着迭代 p'_j , 再迭代 p_{j+1} 和 p'_{j+1} , 如此循环直至将两组投影数据全部循环迭代一次, 算一次完整迭代. 当图像收敛时, 迭代重建结束.

在式(1)的实现过程中, 加权重值矩阵 c_j 的确定非常重要, 它需要足够精确地反映图像像素 f_i 对投影 p_j 的贡献. 常用的确定方法是长度权值法, 如图3(a). 它将射线看作没有宽度的直线, 将其与图像像素相交的长度作为该像素对射线贡献的权值. 该方法简便易行, 但精度较低, 难以满足本文算法要求. 为此, 本文采用如图3(b)的面值



(a) 长度权值法



(b) 面积权值法

图3 两种权值计算方法

Fig. 3 Two approaches determining weight value

权值法确定权值. 它将射线视作有宽度的射束, 将其与像素方块重叠的面积作为该像素对射线贡献的权值. 与长度法相比, 面积法虽然计算复杂, 但更符合工程实际, 能更为精确地反映半像素错位扫描数据的信息相叠特性, 为后续图像重建奠定了基础.

3 计算机仿真

3.1 星形分辨率测试卡

为验证提出的直接重建方法的有效性, 我们利用星形分辨率测试卡(大小为 300×300 像素, 如图4)进行了仿真重建. 仿真条件如下: 射线源到探测器距离(焦距距)为 1000 像素; 探测器探元为 150 个; 周向采样为 360 幅.

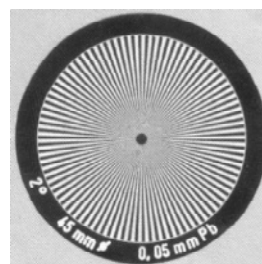


图4 星形分辨率测试卡

Fig. 4 Resolution test cards of star-type

图5是仿真生成的两组半像素错位扫描数据矩阵. 图6(a)和图6(b)给出了利用长度权值法进行重建得到的图像, 图6(c)和图6(d)给出了利用面积权值法进行重建得到的图像. 其中, 图6(a)和图6(c)基于标准扫描投影数据, 图6(b)和图6(d)基于半像素错位扫描投影数据. 由图可知, 应用本文算法后, 半像素错位扫描图像分辨率较标准扫描高, 且同样数据条件下, 面积权值法结果较长度权值法好.

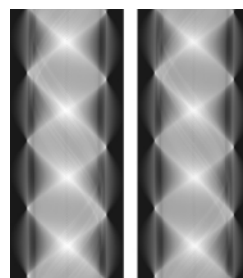
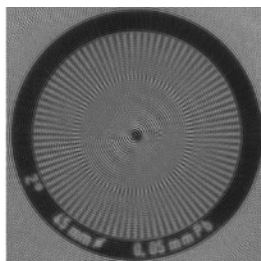
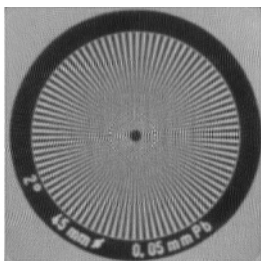


图5 两组半像素错位扫描数据矩阵

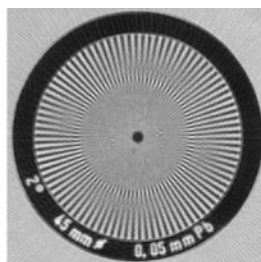
Fig. 5 Two data matrixes of half-pixel offset scanning



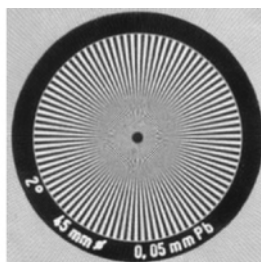
(a) 标准扫描长度权值直接重建法



(b) 半像素错位扫描长度权值直接重建法



(c) 标准扫描面积权值直接重建法



(d) 半像素错位扫描面积权值直接重建法

图 6 不同扫描方式下本文算法重建结果

Fig. 6 Reconstruction results of algorithm in this paper under different scanning modes

3.2 MTF 曲线

为定量描述本文方法效果,我们按标准[15]给出的方法,绘制了面积权值法下,本文算法的调制传递函数(MTF)曲线,反映了特征空间分辨率(对应频率)和调制度的关系,如图 7 所示.由图 7 可知,基于本文算法的半像素错位重建结果在高空间分辨率下仍能保持有 0.8 左右的高调制度.对比之下,传统基于迭代的标准扫描重建结果在截止频率处的调制度已下降到 0.2.这表明,基于本文提出的面积

权值直接迭代算法的半像素错位扫描实现了提高 CT 系统空间分辨率的目的.

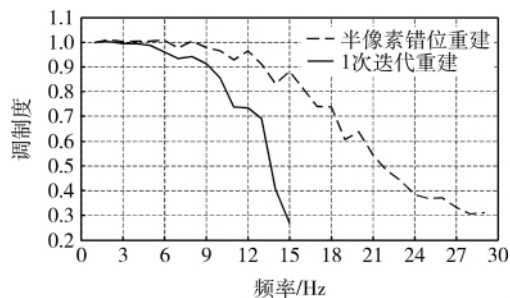


图 7 面积权值重建算法 MTF 曲线

Fig. 7 MTF curve of area-weight reconstruction algorithm

4 实验

为检验本文方法正确性,用标准空间分辨率测试卡进行了实际 CT 扫描重建实验.实验条件如下:探测器探元尺寸为 0.254 mm,焦尺距为 910 mm,探元个数为 500,周向采样为 360 幅,CT 图像尺寸为 1000×1000 像素.图 8 为两组半像素错位扫描数据矩阵,图 9 为 CT 重建图像,图 10 为局部对比图,图中的 LP 表示 line pair.

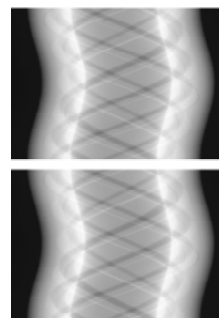


图 8 两组半像素错位扫描数据矩阵

Fig. 8 Two data matrixes of half-pixel offset scanning

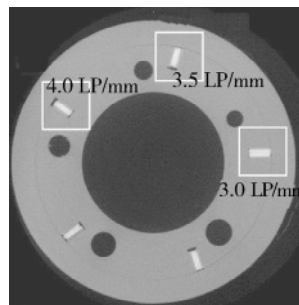
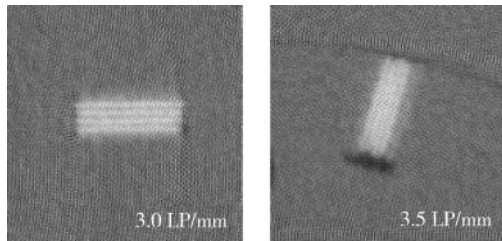
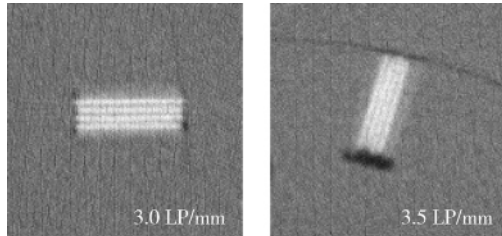


图 9 CT 重建图像

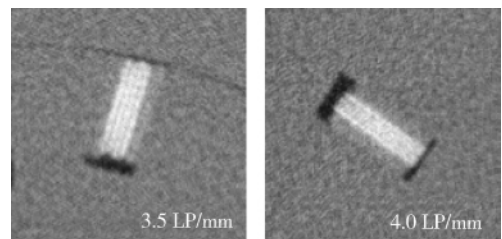
Fig. 9 CT reconstruction slice



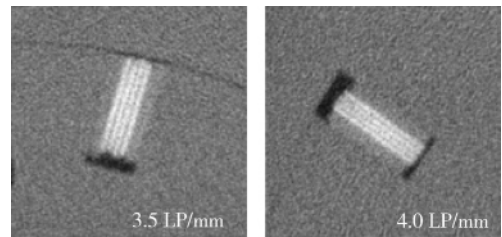
(a) 标准扫描长度权值直接重建法



(b) 半像素错位扫描长度权值直接重建法



(c) 标准扫描面积权值直接重建法



(d) 半像素错位扫描面积权值直接重建法

图10 实验数据重建结果对比

Fig. 10 Comparison of experimental data reconstruction results

由图10可知,应用本文算法后,半像素错位扫描图像(图10(b)和图10(d))分辨率较标准扫描图像(图10(a)和图10(c))高,且同样数据条件下,面积权值法结果(图10(c)和图10(d))较长度权值法(图10(a)和图10(b))好.实验结果表明,本文提出的面积权值直接重建算法与半错位扫描方式结合,有效提高了CT空间分辨率.

5 结论

针对CT成像空间分辨率增强问题,本文提出了一种用于高采样频率半像素错位CT扫描方式的面积权值直接迭代重建算法,并完成了计算

机仿真和实验验证以及MTF曲线定量分析,表明了该方法的可行性和有效性.该方法不需要数据预处理步骤,属于直接重建算法,避免了传统方法存在的病态解和近似解问题,且易于实现,在工业CT系统中有良好应用前景.

参考文献:

- [1] FU Jian, LU Hongnian, LI Bin. X-CT imaging method for large objects using double offset scan mode[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research: Section A, 2007, 575(3): 519-523.
- [2] FU Jian, LU Hongnian. Beam-hardening correction method based on original sinogram for X-CT[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research: Section A, 2006, 556(1): 379-385.
- [3] FU Jian, TAN Renbo, WANG Qianli. A cone beam computed tomography inspection method for fuel rod cladding tubes[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research: Section A, 2012, 688: 1-6.
- [4] FU Jian, JIANG Baihong, LI Bin. Methods determining the angular increment of a continuous scan cone-beam CT system[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2010, 57(3): 1071-1076.
- [5] Lima I, Assis J T, Apoloni C R. Non-destructive imaging materials investigation by microfocus 3D X-ray computed tomography[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2009, 56(6): 1448-1453.
- [6] 傅健, 李斌, 肖迎春. 航空发动机涡轮叶片工业CT图像降噪方法[J]. 航空动力学报, 2010, 25(4): 857-860.
FU Jian, LI Bin, XIAO Yingchun. Denoising method for aeronautical engine turbine blade X-ray industrial CT image[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(4): 857-860. (in Chinese)
- [7] 李保磊, 傅健, 魏东波. 工业计算机断层成像系统转台旋转中心的确定[J]. 航空动力学报, 2009, 24(7): 1544-1548.
LI Baolei, FU Jian, WEI Dongbo. Determination of rotation center in industrial computed tomography system[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(7): 1544-1548. (in Chinese)
- [8] 傅健, 路宏年. 工业CT半扫描成像技术[J]. 北京航空航天大学学报, 2005, 31(9): 966-969.
FU Jian, LU Hongnian. Half-scan mode for industrial CT[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2005, 31(9): 966-969. (in Chinese)
- [9] 傅健, 路宏年, 侯涛, 等. 基于ICT图像的航空发动机涡轮叶片壁厚尺寸精密测量方法[J]. 航空学报, 2006, 27(2): 325-330.
FU Jian, LU Hongnian, HOU Tao, et al. Wall thickness precision measurement method for air engine turbine blade on ICT images[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2006, 27(2): 325-330. (in Chinese)
- [10] 魏东波, 傅健, 李斌, 等. 提高三维ICT成像空间分辨率的

- 扫描方式及其重建算法[J]. 航空动力学报, 2007, 22(5): 768-772.
- WEI Dongbo, FU Jian, LI Bin, et al. Scan mode and its reconstruction algorithm for improving spatial resolution of 3D-ICT[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(5): 768-772. (in Chinese)
- [11] Lonn A H. Computed tomography system with translatable focal spot; USA, 5173852[P]. 1992-12-22.
- [12] 张朋, 郭明焕. 由相叠的低分辨扇形束投影数据重建高分辨 CT 图像[J]. 核技术, 2002, 25(10): 805-810.
- ZHANG Peng, GUO Minghuan. Reconstruction high resolution image from overlapped low resolution fan beam projections data[J]. Nuclear Techniques, 2002, 25(10): 805-810. (in Chinese)
- [13] 张慧滔, 田娟, 陈明. 等. 新的超分辨 CT 扫描模式和图像重建方法[J]. 中国体视学与图像分析, 2005, 10(3): 154-157.
- ZHANG Huitao, TIAN Juan, CHEN Ming, et al. A novel scanning mode and image reconstruction method on super-resolution CT[J]. Chinese Journal of Stereology and Image Analysis, 2005, 10(3): 154-157. (in Chinese)
- [14] 庄天戈. CT 原理与算法[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1992: 88-93.
- [15] American Society for Testing and Materials (ASTM). E1441-00(2005) Standard guide for computed tomography (CT) imaging[S]. West Conshohocker, US: ASTM, 2005.