

一种新的TR层析扫描投影 重排算法*

孙亮,籍雁翔,宋鑫,杨民

(北京航空航天大学机械工程及自动化学院,北京 100191)

[摘要] TR层析扫描可对超出射束范围的大尺寸构件进行检测,在工业CT领域有着重要的应用。目前使用的一种重建方法是在忽略扇角的影响下,将TR扫描正弦图直接重排成标准平行束正弦图,然后使用平行束的重建方法进行重建,这样导致重建图像存在一定误差。提出一种新的重排算法,通过坐标转换和插值计算,得到平行束正弦图中的各采样点在TR扫描正弦图中对应的映射点坐标及灰度信息,进而得到完整的平行束正弦图。通过仿真和试验,发现应用新算法得到的正弦图和重建图像均消除了边缘不光滑和伪影现象。新的重排算法能够消除现有重排算法的误差,使得TR扫描方法在扇束角较大时也能实现正确CT重建。

关键词: TR层析扫描;正弦图;投影重排;坐标转换;CT重建

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.14.076



孙亮

博士生研究生,主要从事X射线检测技术相关研究工作。

X射线检测技术从最初的胶片射线照相技术,经过百年的发展,已形成了由X射线照相、X射线实时成像、CT(Computed Tomography)检测等技术所构成的比较完整的X射线检测技术体系^[1-3]。近年来发展比较迅猛的工业CT检测技术更是适用于对复杂结构件的检测,并可与CAD(Computer Aided Design)、CAM(Computer Aided Manufacturing)等先进设计制造技术结合而形成逆向工程^[4]。这些优势都是其他无损检测技术所不具备的。X射线CT成像检测技术得到的检测图像是与工件材料、结构、组成成分及密度等特性相对应的二维断层图像,不存在信息叠加的问题^[5]。其检测图像是数字化的结果,从中可直接得到CT值、像素尺寸等

物理信息,且数字化图像便于储存、传输、分析和处理等。它还具有高的空间和密度分辨能力,高的动态范围和可靠性。

然而,被检测对象常常在材料、形状、尺寸等方面有较大的不确定性,当检测对象尺寸大于探测器尺寸时,往往会发生由于视野FOV(Field Of View)无法完全覆盖被测物而出现横向数据截断问题,不满足滤波反投影重建算法的数据要求^[6]。此时,必须对扫描方案进行重新设计。

第2代CT扫描具有结构简单、成本低等优点,是工业无损检测领域中一种重要的检测方法。其TR(Transverse Rotation)扫描方式在超过射束范围的大尺寸构件检测方面具备独特优势^[7-8]。第2代CT扫描没有直接的滤波反投影重建算法,但

*基金项目:国家重大科学仪器设备开发专项(2014YQ240445);装备预先研究项目(41423030512)。

由于 TR 扫描方式与平行束扫描具有相同的特点,所以工业上常用的第 2 代 CT 重建算法是将其投影数据重排成标准平行束数据,然后使用平行束的滤波反投影重建算法进行重建^[9]。文献 [10] 提到的第二代 CT 滤波反投影重建算法和文献 [11] 提到的窄角扇束重建方法均是基于这种重排算法实现的重建。文献 [12] 指出扇束中不同角度的射线与物体平移方向的夹角不同,导致物体平移同样的步进距离,其旋转中心与不同角度射线的距离变化是不同的,这会造成一定的重建误差,该误差随着扇角的增大而迅速增加。叶海霞等^[11] 也指出,目前应用的重排重建算法仅适用于扇角较小的第 2 代 CT 扫描重建。

本文提出一种新的投影重排算法,可对第 2 代 CT 扫描过程中,由于扇束不同角度射线的采样距离不同引起的误差进行修正。新的重排算法对第 2 代 CT 扫描的扇角大小没有限制。最后通过模拟数据和真实投影数据验证了本文提出的投影重排算法在 2 代 CT 重建中的有效性。

TR 扫描方式及重排问题

第 2 代 CT 的 TR 扫描方式与第 1 代平行束 CT 扫描相比没有本质区别,都是通过射线源和物体相对平移和旋转的方式获得 CT 重建需要的投影数据^[13-16]。不同的地方在于第 2 代 CT 使用了扇束的射线源,在一次平移运动过程中相当于同时获得了不同角度的数据,因此第 2 代 CT 扫描可以通过较少的旋转次数就获得完整的能用于重建的投影数据。

TR 扫描方式可以在物体尺寸超过 X 射线扇束空间范围时,仍然可以通过物体的平移运动获取完整的 CT 投影数据,适用于构件尺寸较大无法通过旋转扫描获取完整投影数据的场合^[17-18],其扫描示意图如图 1 所示。图 1 中物体的运动方式为平移和旋转交替进行,首先将物体从 X

射线扇束区域的一侧平移运动到另一侧,然后物体旋转一个步进角 S (S 为射束扇角大小) 后再平移回初始位置,反复执行 $180^\circ/S$ 次,便可获得应用平行束滤波反投影重建所需的完备数据。

图 2 为扇束角与平移步距间的关系,为了更加清晰地说明,假定物体固定射线移动。 SA 为扇形束中心射线,平移后为 S_1A_1 。 SB 为扇形束某条射线,平移后为 S_1B_1 。平移步距为 d ,扇束角 $S=2\alpha$ 。可见 SA 与 S_1A_1 的距离为 d ,而 SB 与 S_1B_1 的距离 $d_1=d \cdot \cos\alpha$ 。现有的一种重排方法是在假设 $d \approx d_1$ 的情况下,将 TR 扫描数据直接重排成平行束投影数据,然后应用平行束的滤波反投影重建算法进行重建^[11]。这种重建方法被称为“重排重建”。

由于扇束中不同角度的射线与物体平移方向的夹角不同,导致物体平移同样的步进距离,其旋转中心与不同角度射线的距离变化是不同的,这将会造成 TR 扫描的数据对每一条射线而言的采样距离是不同的。当 α 较大时,再以 $d \approx d_1$ 的条件进行重排,便会造成重建结果出现严重误差。

本文提出的重排算法

本文提出的重排算法是通过先确定平行束正弦图投影区域的范围和平行束正弦图中各采样点的坐标,然后通过坐标转换得到其映射在 TR 扫描正弦图中各映射点的坐标位置。在 TR 扫描正弦图中通过插值获得各映射点的灰度值,进而获得平行束正弦图中各采样点的灰度信息。这样即可在理论上消除在假定条件下^[11]

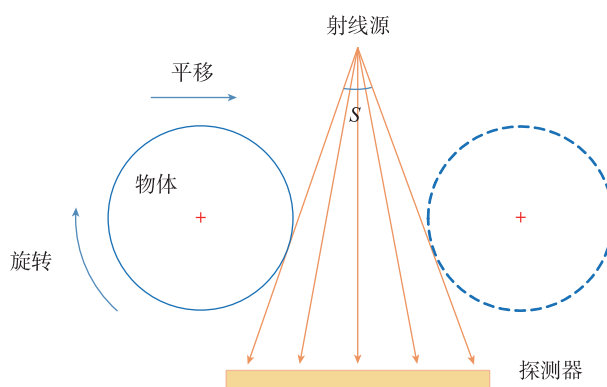


图1 TR扫描方式物体运动模式示意图

Fig.1 Sketch of object motion mode in TR scanning mode

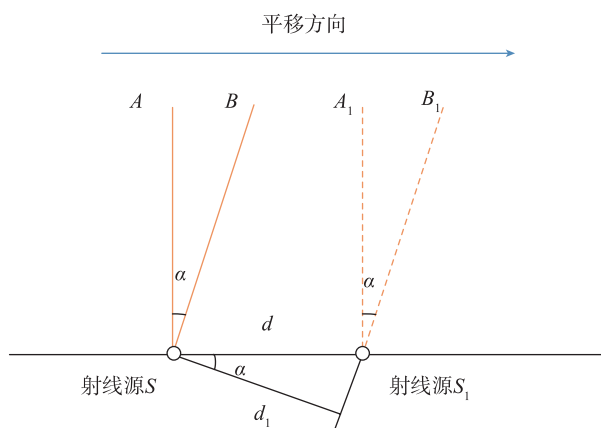


图2 扇束角与平移步距间的关系

Fig.2 Relation between fan beam angle and translation step distance

直接将 TR 扫描正弦图重排为平行束正弦图带来的误差。

1 TR 扫描正弦图坐标计算

新的重排算法本质是确定 TR 扫描正弦图和平行束扫描正弦图两个坐标之间的映射关系。对于平行束正弦图而言,两个重要的参数分别为投影角度 θ 和物体旋转中心到射线的距离 x 。TR 扫描中,探测器每一次采集一行数据,TR 每次平移的扫描数据由多行数据组成,其正弦图的列坐标可以看作探测器的探元坐标索引 p_d ,行坐标可以看作是第 p_i 次扫描(p_i 为扫描行数)。因此该重排算法便是寻找 (p_d, p_i) 和 (θ, x) 的对应关系。

图 3 (a) 为 TR 扫描正弦图坐标范围,图 3 (b) 为平行束扫描正弦图坐标范围。红色区域为一个扇角的数据,可以发现,对于物体旋转中心到射线的距离相同的一组数据在平行束正弦图中对应的是一列数据,在第 2 代 TR 扫描正弦图中则是对应了一条从左上角到右下角的曲线。

图 4 为根据物体旋转角度计算探测器索引的原理图,可知探测器索引 p_d 可以由 θ 获得,具体表示为:

$$p_d = p_f + D \times \tan\left(\theta_s - \frac{S}{2}\right) \quad (1)$$

式中, p_d 是探测数据索引; p_f 是射线源焦点在探测器上对应的索引坐标; D 是射线源焦点到探测器的垂直距离; S 为每次扫描物体的自转角度(和射束扇角大小一致); θ_s 是总旋转角度 θ ($\theta \in [0, \pi]$) 在每一步扫描中所对应的射线角度,且有 $\theta_{s,d} = \theta_{s,d+S}$, ($\theta_s, d \in [0, S]$), 可通过用旋转角度 θ 对扇角取余得到,即 $\theta_s = \theta \bmod (S)$ 。

扫描行数 p_i 可以通过确定物体旋转中心位置 p_o 确定。由图 5 可知,物体旋转中心位置 p_o 是由角度 θ_s 和旋转中心到投影射线的距离 x 共同决定的。

具体表示为:

$$p_o = p_d + \frac{x}{\cos\left(\theta_s - \frac{S}{2}\right)} \quad (2)$$

通过式(1)和式(2)可以得到

平行束正弦图坐标 (θ, x) 和探测器索引坐标 p_d 以及物体旋转中心位置 p_o 之间的关系。然而,为了确定物体旋转中心位置和 TR 扫描正弦图的行坐标 p_i 之间的关系,还需要了解旋转

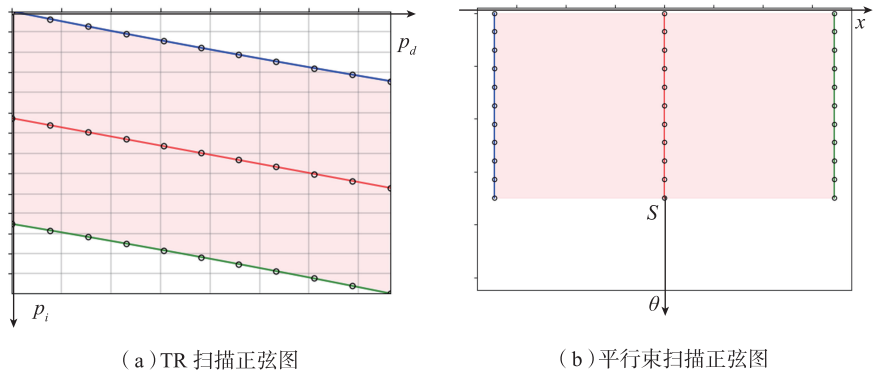


图3 TR扫描正弦图与平行束扫描正弦图对应关系

Fig.3 Relation between TR scanning sinogram and parallel beam scanning sinogram

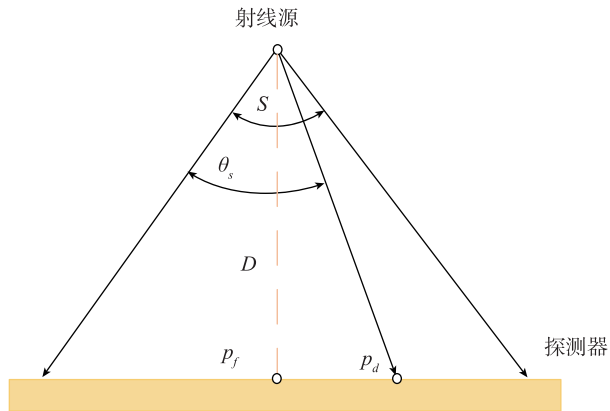


图4 物体旋转角度计算探测器索引原理图

Fig.4 Object rotation angle calculation detector index schematic

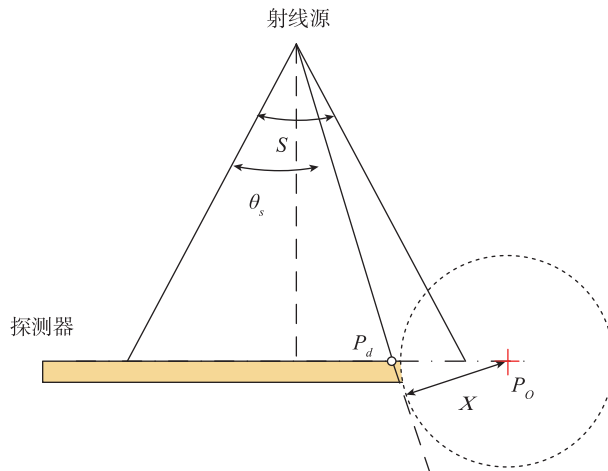


图5 根据平行束正弦图坐标计算物体旋转中心位置原理图

Fig.5 Principle diagram for calculating position of object's rotation center according to coordinates of parallel beam sinogram

中心在 TR 扫描正弦图中的位置。

2 TR 扫描正弦图中物体旋转中心坐标计算

物体旋转中心在 TR 扫描正弦图中的运动轨迹和每次扫描过程中物体的平移过程相关,在探测的采集频率和物体的移动速度固定时,物体旋转中心在正弦图中的运动轨迹应该是一条直线。

于是扫描行数 p_i 是关于物体旋转中心位置 p_o 的一个线性函数,可表示为:

$$p_i = k \times p_o + b \quad (3)$$

为了得到参数 k 和 b ,采用一种标记法来确定每次扫描过程中物体旋转中心的位置(图 6),通过对特定的中心线模型进行第 2 代 TR 扫描来获取旋转中心的位置信息。

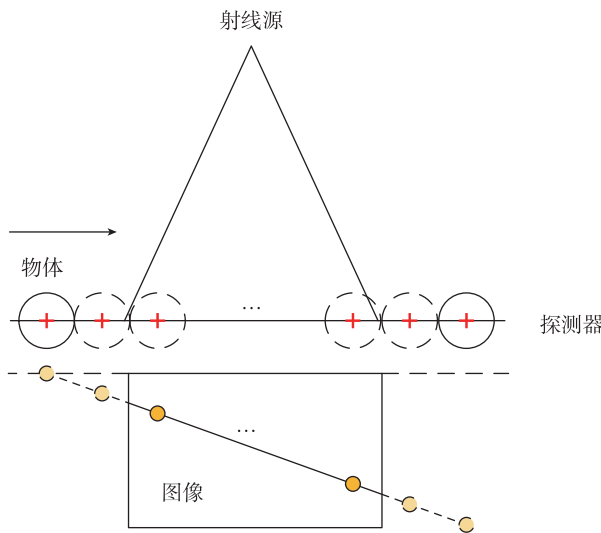


图6 物体旋转中心在扫描图像中的运动轨迹
Fig.6 Motion trajectory of object rotation center in scanned image

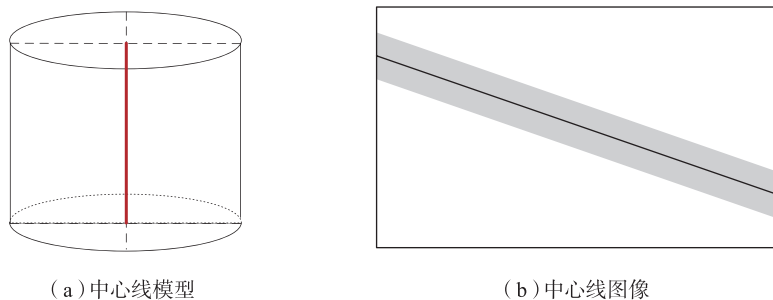


图7 中心线模型和中心线图像
Fig.7 Centerline model and centerline image

图 7 (a) 是一个中心有一条金属丝的圆柱有机玻璃模型,对该模型进行 TR 扫描来标记扫描过程中的旋转中心轨迹。扫描时需要保证中心线模型中的金属丝位于转台的旋转中心,该模型的平移扫描结果如图 7 (b) 所示,称为中心线图像。

对中心线图像进行图像分割,区分出模型投影和背景区域,对模型投影的每一列寻找图像灰度的质心坐标,从而获得中心线图像中物体旋转中心的轨迹点坐标 p_j ,也就是旋转中心的位置 p_o 。对轨迹的行坐标 p_i 和列坐标 p_j 进行最小二乘法直线拟合,便得到式(3)中的参数 k 和 b 。

至此,根据式(1)、式(2)和式(3)便可得到本文提出的 T 重排算法坐标转换公式:

$$p_j = p_f + D \times \tan\left(\theta_s - \frac{S}{2}\right) \quad (4)$$

$$p_i = k \times \left(p_d + \frac{x}{\cos\left(\theta_s - \frac{S}{2}\right)} \right) + b \quad (5)$$

式(4)和式(5)是根据平行束正弦图数据中的坐标 (θ, x) 计算在每步 TR 扫描数据中对应的行列坐标 (p_i, p_j) 。 p_i 是 TR 扫描正弦图中的行坐标, p_j 是 TR 扫描数据中的列坐标也是探测器探元索引坐标。于是,第 2 代 CT 扫描数据便可重排成平行束正弦图示意图。

仿真与试验验证

1 仿真模拟

为了验证新的重排重建算法效果,对模型在不同扇角下 $(10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 45^\circ)$ 的第 2 代 TR 扫描数据分别使用新旧两种重排算法重排成平行束正弦图,然后分别使用滤波反投影法进行重建。图 8 为将 TR 扫描数据应用旧重排方法得到的平行束正弦图,图 9 为其所对应的重建断层图像。图 10 为将 TR 扫描数据应用本文提出的重排方法得到的平行束正弦图,图 11 为其所对应的重建断层图像。对比新旧算法重排得到的平行束正弦图和重建得到的断层图效果。

对比仿真结果可以发现,应用旧算法重排得到的正弦图扇角内部的边缘不完全满足正弦图的趋势,导致正弦图和重建图像的边缘出现不光滑的现象。随着扇角增大,图像的误差明显变大。新算法得到的正弦图则不存在这一现象。重建图像中伪影消失,边缘也变得光滑。随着扇角变化,其重排质量几乎不受影响。

2 试验验证

某发动机外壳尺寸超过了 X 射线扇束范围,无法使用较为简单的旋转扫描方法进行 CT 检测,故使用第 2 代 TR 扫描方式。图 12 为 TR 扫描过程中一次平移运动采集的发动

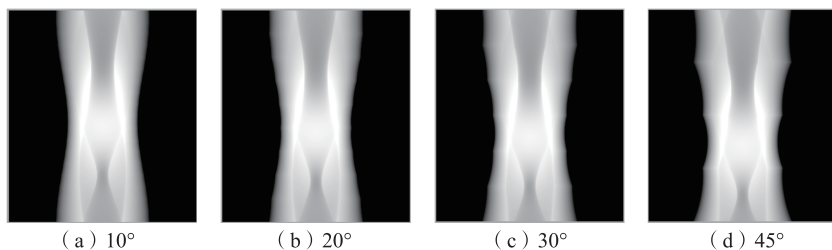


图8 旧算法重排得到的平行束正弦图
Fig.8 Parallel beam sinogram rebined by old algorithm

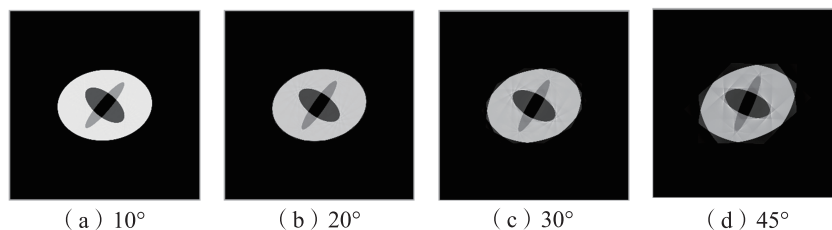


图9 应用图8正弦图重建得到的断层图像
Fig.9 Sectional image reconstructed from sinogram of Fig.8

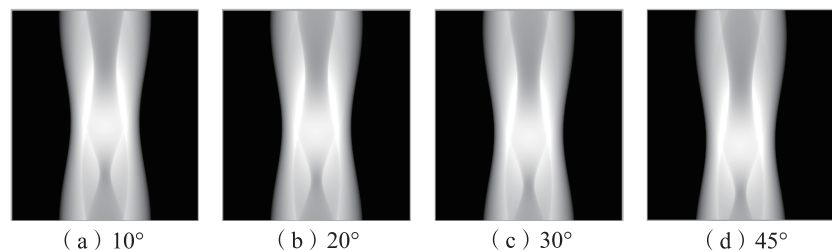


图10 新算法重排得到的平行束正弦图
Fig.10 Parallel beam sinogram rebined by new algorithm

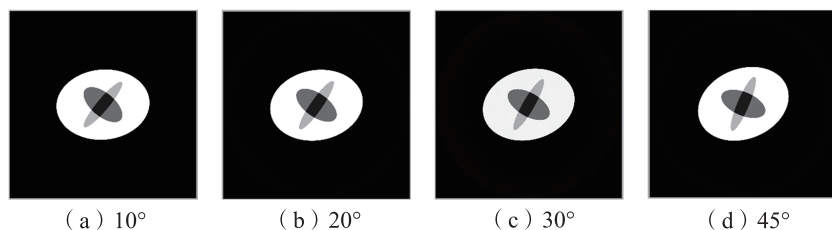


图11 应用图10正弦图重建得到的断层图像
Fig.11 Sectional image reconstructed from sinogram of Fig.10

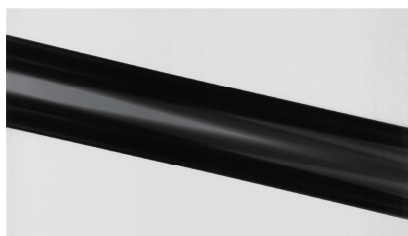


图12 铝合金外壳TR扫描得到的一幅图像
Fig.12 An image obtained by TR scanning of aluminium alloy shell



(a) 旧算法外壳扫描正弦图 (b) 新算法外壳扫描正弦图
图13 新旧算法重排正弦图对比
Fig.13 Comparison of new and old algorithms for rebinning of sinogram

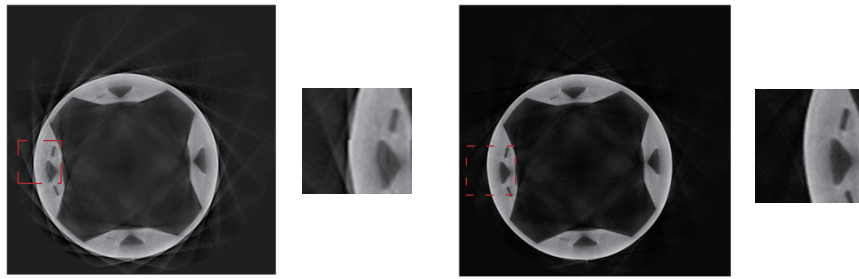
机外壳图像, TR 扫描的数据由多幅这样的图像组成。

使用本文提出的重排方法对采集到的 TR 扫描数据进行重排,得到发动机外壳的等效平行束正弦图。为了对比改进效果,应用旧重排算法得到其等效平行束正弦图。如图 13 所示,可以发现应用本文的重排方法得到的平行束正弦图较之前更光滑。

对应用新旧两种重排算法得到的正弦图分别进行平行束 FBP (Filtered Back-Projection) 重建,得到重建后的外壳图像,如图 14 所示,灰度均进行了归一化处理,灰度显示范围均为 0.2~1。可以发现应用新的重排算法得到的平行束正弦图重建后的图像形状更加光滑,放射条状伪影较少,图像清晰度显著提高。

结论

(1)在现有的 TR 扫描数据重排算法中,由于不同位置 X 射线与物体运动方向夹角不同会导致重排结果存在一定的误差,导致重建图像质量较差。本文提出的重排算法是通过先确定平行束正弦图投影区域的范围和各采样点的位置,通过坐标转换和插值计算,得到平行束正弦图中各采样点在 TR 扫描正弦图中对应的映射点坐标及灰度信息,进而得到平行束正弦图各采样点的灰度值。这样,便得到了完整的平行束正弦图信息。本文的算法从原理上消除了上述重排误差,实现了从 TR 扫描正弦图到平行束正弦图的转换。



(a) 旧算法外壳重建图

(b) 新算法外壳重建图

图14 铝合金外壳重建图像对比

Fig.14 Comparison of reconstructed images of aluminum alloy shell

(2)应用新旧两种重排方法将不同扇角下的TR扫描正弦图重排成平行束正弦图,然后分别进行重建。对比结果发现,当扇角较小时,两种方法得到的图像质量相差不大,轮廓均相对清晰;当扇角较大时,应用旧重排重建方法得到的图像边缘不光滑,随着扇角增大,图像的误差明显变大。应用本文的新方法进行重排重建后,重建图像中伪影消失,边缘更光滑。仿真和试验说明本文提出的重排方法不受扇角大小的影响,进一步验证了新算法的有效性。

参考文献

[1] 荆锋. X射线实时成像系统的应用[J]. 无损检测, 2004, 26(6): 318-320.

JING Feng. Application of X-ray real-time imaging system[J]. Nondestructive Testing, 2004, 26(6): 318-320.

[2] 贡明凯, 刘力. 数字实时成像(DR)与X射线胶片成像对比分析[J]. CT理论与应用研究, 2005, 14(3): 13-17.

YUN Mingkai, LIU Li. Comparative analysis of digital real-time imaging (DR) and X-ray film imaging[J]. CT Theory and Application, 2005, 14(3): 13-17.

[3] 孙永玲. 射线无损检测发展趋向[J]. 无损检测, 1996(11): 328-330.

SUN Yongling. Development trend of radiation nondestructive testing[J]. Nondestructive Testing, 1996(11): 328-330.

[4] 王侃. 产品工业CT扫描重建模型与CAD模型比对技术的研究与实现[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.

WANG Kan. Research and implementation of the comparing technology between CT

scanning reconstruction model and CAD model for product industry[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.

[5] 倪培君, 蔡和平, 任安峰, 等. 基于组分特性的材料密度工业X射线CT定量检测[J]. 无损检测, 2011, 33(7): 5-10.

NI Peijun, CAI Heping, REN Anfeng, et al. Quantitative detection of material density by industrial X-ray CT based on component characteristics[J]. Nondestructive Testing, 2011, 33(7): 5-10.

[6] 杜乙, 王贤刚, 向新程. 一种用于CT偏置扫描重建的指数型加权函数[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2015, 55(1): 115-121.

DU Yi, WANG Xiangang, XIANG Xincheng. An exponential weighting function for CT offset scanning reconstruction[J]. Journal of Tsinghua University (Natural Science Edition), 2015, 55(1): 115-121.

[7] 周光湖. 计算机断层摄影原理及应用[M]. 成都: 成都电讯工程学院出版社, 1986.

ZHOU Guanghu. Principles and applications of computed tomography[M]. Chengdu: Chengdu Telecommunications Engineering Institute Press, 1986.

[8] 王增勇, 汤光平, 李建文, 等. 工业CT技术进展及应用[J]. 无损检测, 2010, 32(7): 504-508.

WANG Zengyong, TANG Guangping, LI Jianwen, et al. Progress and application of industrial CT technology[J]. Nondestructive Testing, 2010, 32(7): 504-508.

[9] 毛小渊. 二维CT图像重建算法研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2016.

MAO Xiaoyuan. Research on two-dimensional CT image reconstruction algorithm[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2016.

[10] 王露衡. 第二代CT卷积反投影重

建算法的研究及三种CT扫描方式的仿真[D]. 重庆: 重庆大学, 2000.

WANG Luheng. Research on the second generation CT convolution back projection reconstruction algorithm and simulation of three CT scanning methods[D]. Chongqing: Chongqing University, 2000.

[11] 叶海霞. 工业CT窄角扇束卷积反投影并行图像重建研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2003.

YE Haixia. Research on parallel image reconstruction of industrial CT narrow-angle fan beam convolution back projection[D]. Chongqing: Chongqing University, 2003.

[12] 蒋阳. 基于WINDOWS'98窄扇束角扫描CT图像系统实用化研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2000.

JIANG Yang. Practical research on CT image system based on WINDOWS '98 narrow fan beam angle scanning[D]. Chongqing: Chongqing University, 2000.

[13] 庄天戈. CT算法与原理[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1992.

ZHUANG Tiange. CT algorithm and principle[M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 1992.

[14] 谢强. 计算机断层成像技术—原理, 设计, 伪像和进展[M]. 北京: 科学出版社, 2006.

XIE Qiang. Computed tomography—principles, design, artifacts and progress[M]. Beijing: Science Press, 2006.

[15] NOOF, DEFRISE M, CLACKDOYLE R, et al. Image reconstruction from fan-beam projections on less than a short scan[J]. Physics in Medicine and Biology, 2002, 47(14): 2525-2546.

[16] 傅健, 路宏年. 一种新颖的ICT扫描方式及其FBP重构算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2003, 29(1): 9-12.

FU Jian, LU Hongnian. A novel ICT scanning method and its FBP reconstruction algorithm[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003, 29(1): 9-12.

[17] PHONG B T. Illumination for computer generated pictures[J]. Communications of the ACM, 1975, 18(6): 311-317.

[18] HERMAN G T. Image reconstruction from projection: the fundamentals of computed tomography[M]. New York: Academic Press, 1980.

通讯作者: 杨民, 博士、教授、博士生导师, 研究方向为X射线检测技术, E-mail: minyang.ndt@buaa.edu.cn.

A New Method of Rebinning Projections for TR Tomographic Scanning

SUN Liang, JI Yanxiang, SONG Xin, YANG Min

(School of Mechanical Engineering & Automation, Beihang University, Beijing 100191, China)

[ABSTRACT] TR tomographic scanning can detect large-scale components beyond the beam range, and has important applications in the field of ICT. One of the current reconstruction methods is to directly rebinding TR scan sinogram into standard parallel-beam sinogram without considering the influence of sector angle, and then reconstruct them using parallel-beam reconstruction method, which results in some errors in the reconstructed images. In this paper, a new rebinding algorithm is proposed. Through the coordinate transformation and interpolation calculation, the coordinates and gray scale information of the corresponding mapping points of the sampling points in the parallel sinogram are obtained in the TR scan sinogram. In this way, a complete parallel beam sinogram is obtained. Through simulations and experiments, it is found that the edge smoothness and artifacts are eliminated in both the sinogram and the reconstructed image obtained by the improved algorithm. The new rebinding algorithm can eliminate the errors of the existing rebinding algorithm. The TR scanning method can also achieve correct CT reconstruction when the fan beam angle is large.

Keywords: TR tomographic scanning; Sinogram; Rebinding projections; Coordinate transformation; CT reconstruction

(责编 铃兰)

(上接第66页)

Rapid Ultrasonic Inspection Technology for Complex-Shaped Composite Components

YU Xudong

(School of Astronautics, Beihang University, Beijing 100191, China)

[ABSTRACT] Complex-shaped composite components have been extensively utilized in the aerospace industry. This paper investigates the feasibility of using ultrasonic feature guided waves (FGW) for rapid screening of two representative long-range composite structures, i.e. laminated bends and adhesive composite joints. Such FGWs are capable of focusing the propagation energy along the structural feature, with limited leakage into the adjacent plate. They also exhibit little-dispersive and low-attenuative characteristics. Modal studies of the anisotropic viscoelastic waveguide were carried out via the semi-analytical finite element (SAFE) method to reveal the existing FGW modes. Both 3D finite element (FE) simulations and experiments were performed to cross-validate the modal properties of identified FGW modes and to study their interaction with different defects occurring in the structural feature, such as interlaminar delamination, cracks, and adhesive debonding. The wave-defect resonance phenomenon and the reflection behaviour were investigated for localizing these defects. The potential of proposed FGW-based approach for efficient damage detection in complex-shaped composite components is well demonstrated.

Keywords: Composites; Complex shapes; Nondestructive testing (NDT); Ultrasonic guided waves; Energy concentration

(责编 铃兰)