

文章编号: 1000-8055(2009)07-1544-05

工业计算机断层成像系统转台旋转中心的确定

李保磊, 傅 健, 魏东波, 李俊江
(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191)

摘 要: 构建一个工业 CT(computed tomography) 成像系统, 转台旋转中心的确定是非常关键的步骤, 其定位误差会引起 CT 图像上的伪影. 在详细分析了现存旋转中心确定方法不足的基础上, 提出了一种新方法, 该方法基于正弦图数据的冗余性, 通过计算将正弦图数据总和均分的位置来定位旋转中心. 相对现有算法, 该方法无须使用模体, 亦无需知晓任何几何参数, 且基本不受随机噪声影响. 实际的实验数据验证了该方法的有效性.

关 键 词: 工业 CT(computed tomography); 旋转中心; 正弦图; 共轭投影; 数据冗余
中图分类号: TP391 **文献标识码:** A

Determination of rotation center in industrial computed tomography system

LI Bao lei, FU Jian, WEI Dong bo, LI Jun jiang

(School of Mechanical Engineering and Automation,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The determination of the COR (center of the rotation) of the rotating table is a key step to set up an industrial computed tomography system. The error of the COR can lead to artifacts in CT (computed tomography) image. The current popular methods about COR determination were described and their disadvantages were presented. Based on the analysis, one novel method was put forward. The proposed algorithm was based on the redundancy character of sinogram, and the COR was located by calculating the position at which the sum of the sinogram data was divided equally. As compared with the current methods, the proposed algorithm need not any phantom and geometry parameter, and is hardly affected by random noise. The feasibility of the method is validated by the experiment data.

Key words: industrial computed tomography; center of rotation; sinogram;
conjugate projection; data redundancy

X 射线工业 CT(computed tomography) 成像是工业无损检测的一种重要技术手段, 在现代航空航天制造业中起着越来越重要的作用, 它通过对工件的各个断层层析成像来判断被检工件的内部结构、装配情况、材质状况、有无缺陷、缺陷的性质和大小

等. 如航空发动机中的涡轮叶片, 为了保障其内部无缺陷, 需对其进行无损检测, 工业 CT 是最常用的无损检测手段. 构建一个工业 CT 系统, 首先要做的事情就是精确建立成像几何坐标系, 即重建几何坐标系. 在建立重建几何坐标系的过程中, 需要

收稿日期: 2008-05-07; 修订日期: 2008-11-19

基金项目: 北京市教育委员会共建项目; 航空科学基金(20070951013); 航天科技创新基金(CASC0410);
国家自然科学基金(50875013; 50575015)

作者简介: 李保磊(1980-), 男, 山东菏泽人, 博士生, 主要研究方向为射线 DR, CT 成像; 信号、图像处理与识别.

E-mail: baolei_li@yahoo.com.cn

精确测量一个重要的位置参数, 即转台旋转中心 (COR) 位置坐标, 此参数即为转台旋转中心经射线源投影在探测器上的位置坐标, 同时它也是重建几何坐标系的坐标原点位置. 其误差会引起 CT 图像中的伪影^[1-2], 导致 CT 图像降质. 因此 COR 的精确确定在组建 CT 系统时是十分必要和关键的.

现有文献中提到的 COR 的确定方法主要分为针对平行束扫描的方法和针对扇束扫描的方法两类, 当然, 适用于扇束扫描的方法自然适用于锥束扫描的情况, 因为从锥束扫描数据中可以得到扇束扫描数据. 目前文献中针对平行束扫描的 COR 确定方法主要有线模扫描法^[3], 对称投影相关法^[3], 图像配准方法^[4-5], 重心法^[3-5], 迭代法^[4,6]等. 由于目前平行束扫描基本不被工程实践采用, 使得这些算法的实际使用价值大大降低. 尽管扇束扫描数据可以重排为平行束数据, 但是由于中间的数据插值过程, 降低了数据精度, 也必然降低算法的精度, 且增加了重排的过程, 使得 COR 的确定过程复杂化. 扇束扫描和锥束扫描是目前工业 CT 采用的主流扫描方式, 目前扇束扫描的 COR 确定算法主要有正弦图中心法^[7], 相对角方法^[7], 几何法^[7], 迭代法^[4,6]等. 正弦图中心方法是以射线源与旋转中心的连线垂直于探测器平面为前提的, 且需要对线模进行扫描; 而相对角法也须采用线模扫描, 实现过程繁琐且精度受噪声影响较大, 几何法虽然适合射线源与旋转中心的连线不垂直于探测器的情形, 但是却需要已知焦距的精确值和中心射束的精确位置, 这在实际实践中是很难做到的, 迭代法受计算效率的制约, 实用性较差. 现存方法的局限性限制了工业 CT 的实际工程应用, 急需寻找一种适用于扇束扫描, 精度高, 简单方便的 COR 确定方法, 基于此, 本文对 COR 的高精度确定进行了深入研究.

1 基于正弦图冗余信息的 COR 确定方法

1.1 算法原理

CT 扇束 360° 扫描得到的正弦图数据是冗余的^[8], 利用冗余数据信息寻找 COR 是本方法的主导思想.

在等角扇束扫描过程中投影之间有如下的关系^[8]

$$P(\beta, \gamma) = P(\beta + \pi - 2\gamma, -\gamma) \quad (1)$$

其中 β 为射线源的旋转角度, γ 为等角探测器上的投影(角度)地址, $P(\beta, \gamma)$, $P(\beta + \pi - 2\gamma, -\gamma)$ 被称为

共轭投影. 类似的可以推导出扇束等距的情形, 有

$$P(\beta, s) = P(\beta + \pi - 2\gamma, -s) \quad (2)$$

s 为等距探测器的投影地址, γ 为投影地址为 s 的射线与中心射束的夹角. 如图 1 所示, 其中 s_m 最大投影地址.

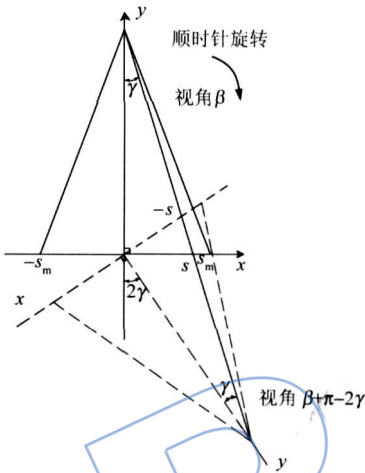


图 1 标准几何扫描机构示意图

Fig. 1 Sketch map of standard geometry scan mechanism

扇束扫描的正弦图表示如图 2 所示, 其中 s_l , s_r 为探测器左右两边界最大投影地址, γ_{ml} , γ_{mr} 分别为探测器左右两边界对应的射线束相对中心射束的最大偏角. 根据共轭投影的几何关系可知, 梯形区域 1 和 3 内虚线部分投影值自上而下对应相等, 梯形区域 2 和 4 内虚线部分投影值自上而下对应相等. 因此区域 1 和 3 是数据对应相等的两个区域, 区域 2 和 4 也是数据对应相等的两个区域. 此即扇束扫描的投影数据不但是冗余的, 且恰恰冗余了一半. 而 COR 也恰恰将冗余的数据分成相等的两半, 对于 COR 左边的投影数据, 在 COR 的右边必有与之相等的对应的投影数据, 反过来亦是如此. 那么位于 COR 左边的投影数据的总和应该与 COR 右边的投影数据的总和相等. 即

$$\int_{-s_l}^0 \int_0^{2\pi} P(\beta, s) ds d\beta = \int_0^{s_r} \int_0^{2\pi} P(\beta, s) ds d\beta \quad (3)$$

根据上式即可求出 COR 的坐标来.

实际执行过程中, 本文采用了如下的策略:

设定两函数

$$\begin{aligned} f(s) &= \int_{-s_l}^0 \int_0^{2\pi} P(\beta, s) ds d\beta \\ g(s) &= \int_0^{s_r} \int_0^{2\pi} P(\beta, s) ds d\beta \end{aligned} \quad (4)$$

$f(s)$ 为关于 s 的单调递增函数, $g(s)$ 为关于 s 的单

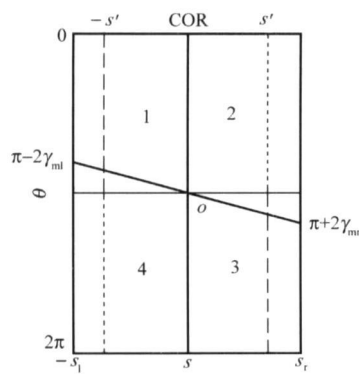


图 2 扇束扫描正弦图表示

Fig. 2 Sinogram sketch of fair beam scan

调递减函数. 在当 s 为 COR 的位置坐标时, 必有

$$f(s) = g(s) \tag{5}$$

求解上述方程即可得出 COR 的坐标数值. 为了提高精度, $f(s), g(s)$ 均可先进行曲线拟合, 再求解方程的解, 可以得到较为精确的解, 可以达到更高的精度. 当然也可以通过线性插值的方法求解.

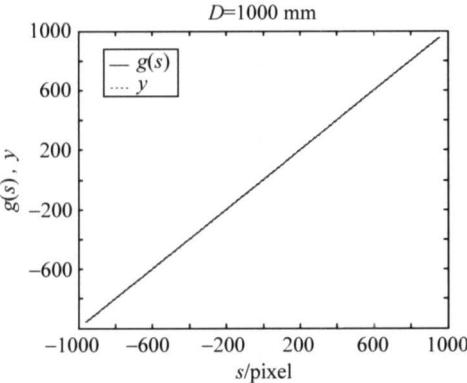
1.2 算法适用性分析

上述分析是基于射线源与旋转中心的连线垂直于探测器这个条件, 即标准几何扫描结构. 上述共轭投影关系公式(2)也是在此条件下推导出来的. 然而在工程实践中, 此条件往往不能严格满足, 那么当条件不能严格满足时, 即探测器存在一定的偏摆角或者说转台旋转中心偏移中心射束一定位移时, 共轭投影关系如何呢? 这是更加一般的情况, 即有中心偏移的几何扫描结构, 如图 3 所示. 经几何关系分析可以推导出

$$P(\beta, s) = P(\beta + \pi - 2\gamma, -s') \tag{6}$$

其中

$$\gamma = \arctan\left(\frac{D \cdot \tan\theta + s}{D}\right) + \theta - \frac{\pi}{2} \tag{7}$$



(a) $s'=g(s)$ 和 $y=s$ 的比较

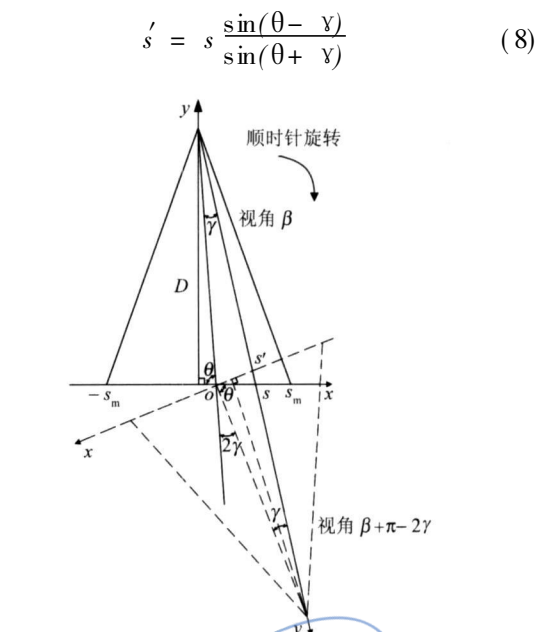
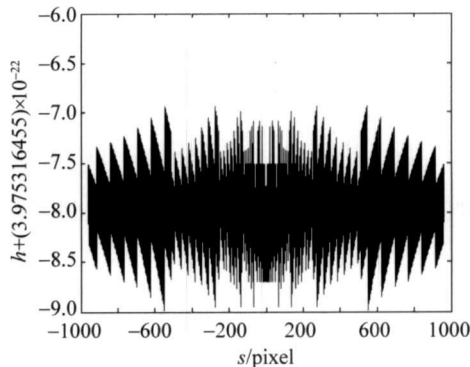


图 3 中心偏移几何扫描结构示意图

Fig. 3 Sketch map of geometry scan mechanism with COR offset

在存在中心偏移, 即射线源与旋转中心连线不垂直于探测器的情况下, 上述算法严格从理论上来说并不适用, 下面通过计算机仿真手段考察 s', s 的关系及相差的幅度.

假设探测器探元间隔为 0.127 mm, 焦距为 1000mm (航空发动机涡轮叶片检测时的常用成像条件). 由上文可知, 为保证成像质量, θ 值与 $\pi/2$ 的差不应超过 $\pm 0.2^\circ$, 这里取 $\theta = 89.8^\circ$. 根据式(7)、式(8)可得 $s' = g(s)$ 与 $y = s$ 的比较结果, 如图 4 所示. 值得指出, 为了在绘图中较为明确的表示 $h(s) = (s' - s)/s$ 随 s 的变化曲线. 图 4(b) 中纵坐标设置为 $h + 3.975316455 \times 10^{-6}$.



(b) $h(s)$ 随 s 变化曲线图

图 4 s 与 s' 的比较

Fig. 4 Comparison between s and s'

可以看出, s' 与 s 在通常检测几何条件下差别小于 0.0001%, 近似相等, 基于此, 上述算法在小角度偏摆角、小幅度中心偏移的情况下, 依然适用, 此结论也就说明了该算法的工程实用性.

2 实验验证

实验 1 在成像条件为: 0.8 mm 焦点射线源, 管电压 200 kV, 管电流 0.5 mA, 焦距 1 200 mm, 探元尺寸 0.127 mm 时, 对某铸件进行断层扫描, 得到正弦图数据如图 5 所示.

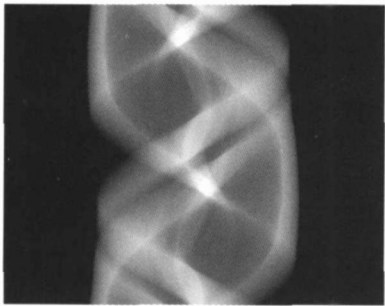


图 5 原始正弦图
Fig. 5 Original sinogram

根据算法原理, $f(s)$, $g(s)$ 的曲线分布如图 6 所示.

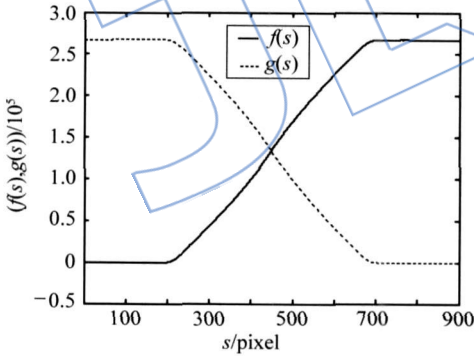
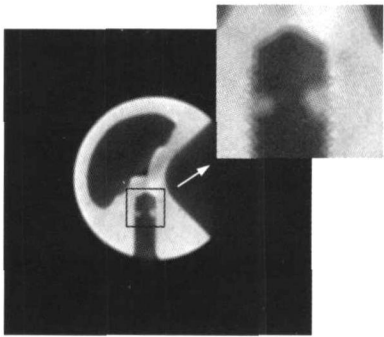


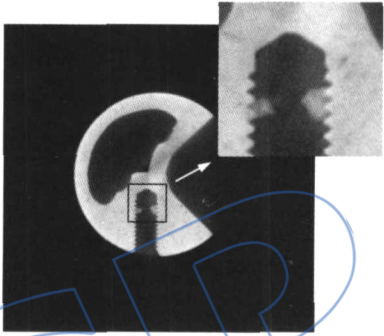
图 6 $f(s)$, $g(s)$ 的曲线分布
Fig. 6 Curve distribution of $f(s)$ and $g(s)$

经求解 $f(s) = g(s)$, 可以检测出旋转中心 COR 的定位为 448.2, 与数据采集中心相差 1.8 个像素. 图 7 是直接把数据采集中心认为是旋转中心重建的结果和进行旋转中心定位误差校正后的重建结果比较.

实验 2 在成像条件为: 1.8 mm 焦点射线源, 管电压 420 kV, 管电流 0.2 mA, 焦距 1 200 mm, 探元尺寸 0.127 mm 时, 对某型号镍合金航空叶片进行扫描, 得到正弦图如图 8.



(a) 校正前原图像



(b) 校正后图像

图 7 旋转中心定位误差校正前后重建结果比较
Fig. 7 Reconstruction image before COR position error correction and after COR position error correction

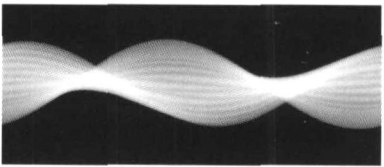


图 8 原始正弦图
Fig. 8 Original sinogram

根据算法原理, $f(s)$, $g(s)$ 的曲线分布如图 9 所示.

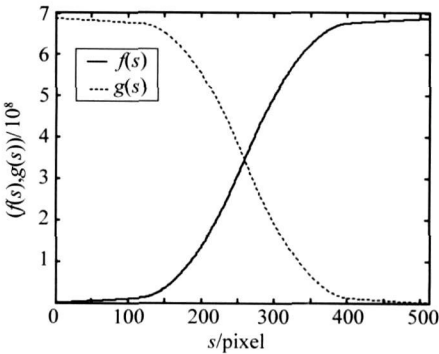


图 9 $f(s)$, $g(s)$ 的曲线分布
Fig. 9 Curve distribution of $f(s)$ and $g(s)$

同样地,经求解 $f(s) = g(s)$,可以检测出旋转中心 COR 的定位为 259.72,与数据采集中心相差 3.72 个像素.图 10 是直接把数据采集中心认为是旋转中心重建的结果和进行旋转中心定位误差校正后的重建结果比较.

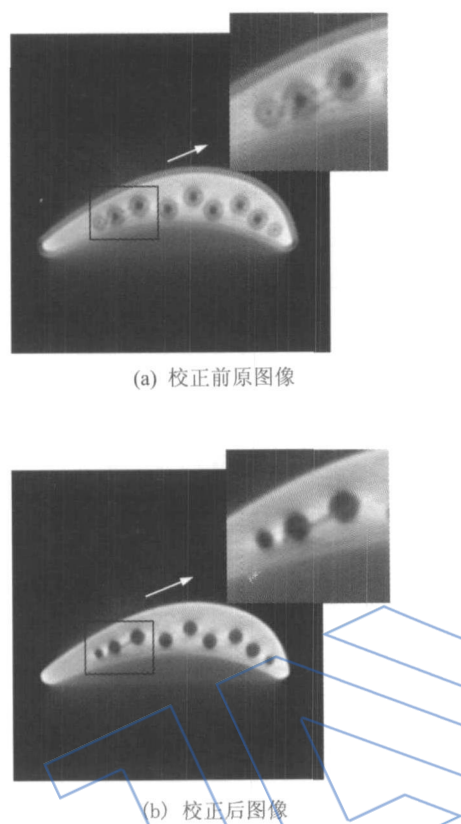


图 10 旋转中心校正前后重建结果比较
Fig. 10 Reconstruction images before COR correction and after COR correction

可以看出,经旋转中心定位误差校正后,重建出的 CT 图像的像质得到明显提高,满足了实际工程需求.至此,本文提出的 COR 确定算法的有效性得到证明.

3 结 论

本文综述了现有 COR 确定方法的技术现状,以及现存方法的不足之处,提出了一种新的基于正弦图信息的 COR 确定算法,该算法相比现存方法具有如下优点:

- 1) 该算法适用于扇束扫描,且在常规成像几何条件下,也适用于中心射束与旋转中心的连线不严格垂直于探测器、存在精度允许范围内的小偏摆角的情形;
- 2) 该算法由于利用到正弦图中灰度求和运算,即式(4)中的积分运算,因此具有强大的噪声抑制功能,基本不受量子随机噪声的影响^[9];
- 3) 该算法无须使用模体,亦无需知晓任何几何参数,只需要采集到的原始投影数据;
- 4) 该算法具有实时性,实现简便,且精度较高,能够满足实际工程需求.

参考文献:

[1] Shepp L A, Hilal S K, Schulz R A. The tuning fork artifact in computerized tomography[J]. Computer Graphics Image Processing, 1979, 10: 246-255

[2] Taylor T, Lupton L R. Resolution, artifacts, and the design of the computed tomography[M]. New York: Elsevier, 1986.

[3] Axevedo S G, Schneberk D J, Fitch J P, et al. Calculation of the rotational centers in computed tomography sinograms[J]. IEEE Transaction on Nuclear Science, 1990, 37 (4): 1525-1540.

[4] Donath T, Beckmann F, Schreyer A. Automated determination of the center of rotation in tomography data[J]. J. Opt. Soc. Am., 2006, A 23: 1048-1057.

[5] Olander B. Center of rotation determination using projection data in x-ray micro computed tomography[D]. Sweden: Linköping University, 1994.

[6] De Carlo B F. A robust procedure for determination of center of rotation in tomography[R]. Proc of SPIE, 2004, 5535: 652-659.

[7] Liu T, Malcolm A. Comparison between four methods for central ray determination with wire phantom in micro computed tomography systems[J]. Optical Engineering, 2006, 45(6): (066402-1)-(066402-5).

[8] Jiang H. Computed tomography principles, design, artifact, and recent advances [M]. Washington: SPIE Press, 2003.

[9] Herman G. Image reconstruction from projection: the fundamentals of computed tomography[M]. New York: Academic Press, 1980: 40-44.