

文章编号 1004-924X(2011)05-0967-05

X射线CT系统投影旋转中心的测量

李保磊^{1,2*}, 张耀军¹

(1. 公安部第一研究所, 北京 100048; 2. 北京大学 数学科学学院, 北京 100871)

摘要:为了精确测量X射线CT成像系统的投影旋转中心坐标,校准投影几何坐标系,消除由其定位误差引起的CT图像伪影,在概述现有方法优缺点的基础上,分析推导了两个引理:“质点扫描一圈,其投影地址的积分为零”以及“任意两质点扫描投影正弦线的交点坐标之和为零”。依据上述引理,设定合适阈值对扫描得到的正弦图进行二值化分割;根据分割结果得到所有穿过物体射线的投影地址,计算这些投影地址的均值获得了投影旋转中心的坐标。实验结果表明,该方法能够高精度地测量投影旋转中心,有效地提高旋转中心校正后的重建图像质量,重复测量精度为0.08个像素。

关键词:X射线CT成像;旋转中心;投影地址;

中图分类号:TH703;R814.42 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111905.0967

Measurement of center of rotation for projection in X-ray computed tomographic system

LI Bao-lei^{1,2*}, ZHANG Yao-jun¹

(1. *The First Research Institute of Ministry of Public Security, Beijing 100048, China;*
2. *School of Mathematical Sciences, Peking University, Beijing 100871, China*)

* *Corresponding author, E-mail: bao-lei_li@yahoo.com.cn*

Abstract: To measure the coordinate of Center of Rotation(COR) for projection in an X-ray CT imaging system, calibrate the projection geometry coordinate system, and to eliminate the CT image artifacts caused by the positioning error of COR, this paper derives two lemmas based on the advantages and disadvantages of existing methods, i. e. ‘A particle is scanned a circle by a CT scanner, then the integral of the particle’s projection addresses under each projection view equals to zero’ and ‘The sum of the crossing point coordinates of projection sine curves of random two particles equals to zero’. According to the above lemmas, an appropriate threshold is set to segment the sinogram to a binary image, the projection addresses of the rays penetrating the object are got based on the segmentation results and then the COR coordinate for projection is obtained by calculating the mean of these projection addresses. The experimental results show that the method can measure the COR precisely and can improve the reconstructed image quality greatly. Moreover, the repeated measurement accuracy is less

收稿日期:2010-06-25;修订日期:2010-10-27.

基金项目:国家科技支撑计划资助项目(No. 2009BAK64B02)

than 0.08 pixel.

Key words: X-ray CT imaging; center of rotation; projection address

1 引言

X 射线计算机断层成像(Computed Tomography, CT)作为一种重要的内视技术手段已广泛应用于国防和国民经济的多个领域,如医疗、工业无损检测、安检等。构建 CT 系统,首先要重建成像几何坐标系,而在建立重建几何坐标系的过程当中,必须高精度测量投影旋转中心(Center of Rotation, COR)的位置坐标,即转台旋转中心经射线源投影在探测器上的位置坐标,它是重建几何坐标系的坐标原点位置。COR 的准确定位对构建 CT 系统举足轻重,其误差会引起 CT 图像中的伪影^[1-2],导致 CT 图像降质。

现有文献中提到的确定 COR 的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。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],相对角法^[7],几何法^[7],迭代法^[4,6]等。正弦图中心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,且其实现过程需要找到正弦图中的左右边界像素,受噪声及边界像素的定位精度影响较大;而相对角法须采用线模扫描,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,这在实践中是很难做到的;迭代法受计算效率的制约,实用性较差。本文作者曾提出基于对称投影的 COR 确定方法以及基于正弦图冗余信息的 COR 确定方法^[8-9]。前者理论上可解决射线源与旋转中心的连线不严格垂直于探测器的情形,但是当被扫描物体是圆对称且恰好放在转台中心位置时,此方法很难保

证精度。后者忽略了散射的影响,也有其不足之处。本文在现有研究的基础上,提出了一种新的 COR 确定方法,该方法在很大程度上克服了原有方法的缺点,且实现起来更加简单方便,更能满足实际工程需求。

2 测量方法原理

在 X 射线二维扇束 CT 扫描过程中,对于任一理想质点 (r, θ) ,其在投影角度 β 下的投影地址为:

$$s(\beta) = \frac{D r \cos(\theta - \beta)}{D - r \sin(\theta - \beta)}, \quad (1)$$

其中 D 是焦距, S_0 为射线源焦点, s 点为投影点,见图 1。分析可知,在常见的 CT 扫描几何布局下, $s(\beta)$ 是一种类似正弦线的曲线(实际并非正弦线,而为类正弦线),而被扫描物体由无穷个质点组成,因此物体被扫描得到的各个视角下的投影数据的组合并非严格的正弦图,而是一种类正弦图。本文为了方便起见,仍然称类正弦图为“正弦图”;同样类正弦线仍称之为“正弦线”。

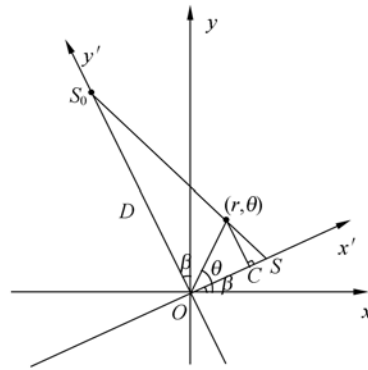


图 1 单个质点 CT 扫描示意图

Fig. 1 Sketch map of one particle's CT scan

根据式(1)经推导可以得到如下的结论:

$$\int_0^{2\pi} s(\beta) d\beta = 0. \quad (2)$$

可以看出, $s(\beta)$ 为周期为 2π 的函数,且在一个周期内的积分值为 0。即“质点扫描一周投影地址坐标的积分为零”。

对任意两个质点,在同一扫描几何布局下,其投影地址曲线为两条类正弦线。在一个周期 $[0, 2\pi)$ 内,此两条类正弦线必有两个交点,见图 2。

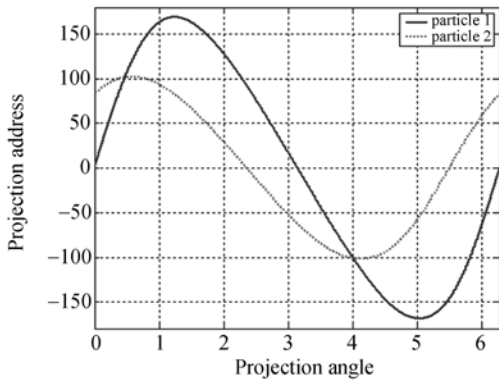


图 2 两个质点正弦曲线示意图
Fig. 2 Sine curves of two particles

两个交点对应的投影地址的关系如图 3 所示, A, B 是物体上的任意两个质点,在物体进行 CT 扫描的过程中, A, B 两点围绕旋转中心 O 做同步旋转运动,相当于线段 AB 围绕旋转中心 O 做刚体旋转运动。因此,旋转中心 O 到线段 AB 的距离是保持不变的。同时,在两个质点对应的正弦曲线的交点处,两质点的投影坐标地址是相等的。这意味着在正弦曲线交点所对应的扫描位置,射线源点 S_0, B, A 三点共线,如图 3 所示。由于存在两个交点,因此存在两个位置,均有射线源点三点 S_0, B, A 共线,在图 3 中对应 S_0, A', B' 共线。

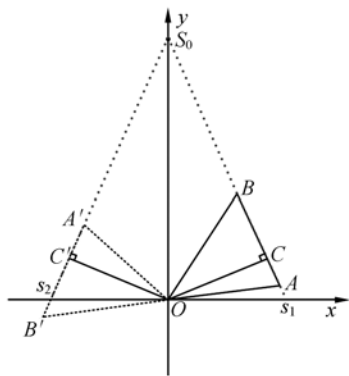


图 3 两个质点正弦曲线交点位置示意图
Fig. 3 Sketch map of crossing point positions in sine curves of two particles

根据上文,旋转中心 O 到线段 AB 的距离保持不变,因此

$$|OC| = |OC'|, \tag{3}$$

其中 C, C' 分别为 O 到 AB, A'B' 的垂足。又因为 $S_0 O$ 为固定值焦距,因此

$$\angle s_2 S_0 O = \angle s_1 S_0 O, \tag{4}$$

故有

$$|Os_1| = |Os_2|, \tag{5}$$

由于 s_1, s_2 位于坐标原点的两侧,如果将 s_1, s_2 记为两个位置下的投影地址坐标,有

$$s_1 = -s_2. \tag{6}$$

根据上文的分析,可以得出结论:“任意两质点投影正弦线的交点坐标之和为零”。

根据“质点扫描一周投影地址坐标的积分为 0”和“任意两质点投影正弦线的交点坐标之和为 0”这两个结论可知,将所有穿过物体的射线的投影地址坐标做平均即可得到投影旋转中心坐标。方法步骤如下:

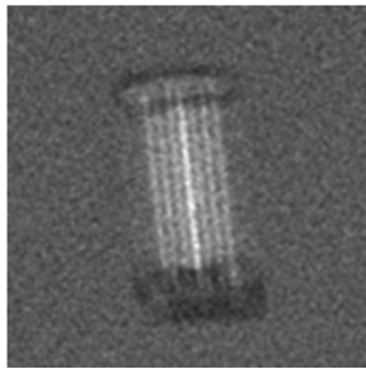
- (1)扫描物体得到投影正弦图;
- (2)设定合适阈值对图像进行分割,得到二值化图像,记录所有穿过物体的射线的投影地址;
- (3)将所有穿过物体的射线的投影地址求平均得到投影旋转中心坐标。

值得指出,阈值的选取一定程度上影响测量精度,当扫描件为高密度物体时,本文采用 OS-TU 阈值分割算法分割正弦图^[10],该方法能够有效将正弦图中的背景(亮场)部分和景物部分分开。当扫描件为轻质材料时,采用此方法分割正弦图不能保证分割精度。但是作为系统校准的一个过程,在进行旋转中心的测量时,也不刻意采用轻质材料,而采用诸如金属件的重质材料即可。实际上,即使采用轻质材料,采用略低于背景亮场灰度的阈值对正弦图进行分割,依然可以得到很好的效果。抑或先将正弦图进行灰度拉伸,对比度增强,再进行阈值分割,也同样奏效。

3 实验结果

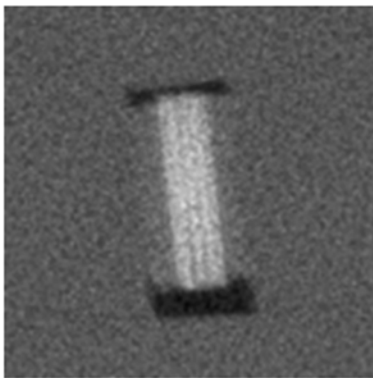
为了考查本文算法的测量精度,比较其与现有算法的性能,本文以分辨率卡作为实验扫描对象,做了对比实验。将本文所得实验结果与采用文献[9]中算法所得实验结果进行了对比,对比结果如下图所示。图 4(a)是将采集数据的中心作为投影旋转中心进行 CT 重建的结果,即不进行投影旋转中心校正的结果。图 4(b)和图 4(c)是

分别利用文献[9]中的方法和本文提出的方法,根据投影旋转中心的测量结果对其进行偏移校正后的 CT 图像重建结果。可以看出,本文方法校正后图像重建的清晰度更高,重建精度也更高,由此证明了本文算法的有效性。



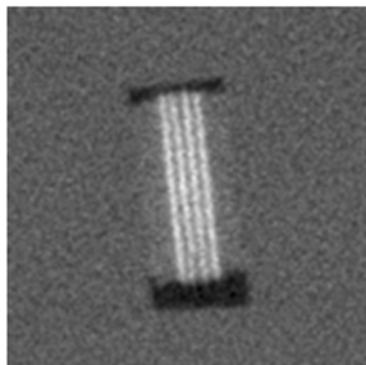
(a) 校正前

(a) Before correction



(b) 文献[9]算法校正结果

(b) Correction by method in [9]



(c) 本文校正结果

(c) Correction by proposed method

图 4 实验结果比较

Fig. 4 Comparison of experimental results

为了考察本文方法的鲁棒性,在一定的成像条件下,利用作者实验室的 CT 扫描设备,置换不同的扫描物体进行了多组实验测量,得到的结果如表 1 所示。

表 1 多组实验测量结果

Tab. 1 Measurement results of multiple experiments

序列号	COR/pixel
1	64.343 7
2	64.370 7
3	64.408 2
4	64.375 8
5	64.353 1
6	64.330 3
7	64.333 3
8	64.349 6
9	64.390 4
10	64.357 0

从表 1 可以看出,采用该方法对不同物体扫描,测量结果的浮动在 0.08 pixel 以内,具有很高的鲁棒性。

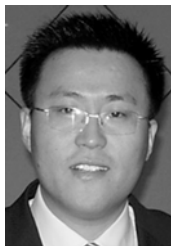
4 结 论

投影旋转中心的测量是构建 X 射线 CT 成像系统,校准成像几何坐标系的重要步骤,其定位误差会引起 CT 图像中的伪影。为了解决这个问题,本文在概述现有方法优缺点的基础上,分析推导了两个引理:“质点扫描一圈,其投影地址的积分为零”以及“任意两质点扫描投影正弦线的交点坐标之和为零”。依据这两个引理,提出了一种基于投影地址求平均的投影旋转中心确定方法。该方法实现过程简单,易于操作,无需使用专用模体,也不需要知道任何成像几何参数,具有很高的鲁棒性,重复测量精度可达 0.08 pixel。该方法在一定程度上克服了现有方法的不足,具有更高的测量精度,满足实际工程需求,得到的实验数据也验证了该方法的有效性和鲁棒性。

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]. Newyork Elsevier, 1986:603-609.
- [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, Report77, Linkoping University, Sweden, 1994.
- [6] de CARLO B F. A robust procedure for determination of center of rotation in tomography [J]. *SPIE*, 2004, 5535: 652-659.
- [7] LIU T, MALCOLM A 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] 李保磊, 傅健, 黄巧珍, 等. 一种基于正弦图的工业CT系统转台旋转中心的自动确定方法[J]. *航空学报*, 2009, 30(7):1341-1345.
LI B L, FU J, HUANG Q ZH, *et al.*. Method for determination of center of rotation in industrial computed tomography systems based on sinogram[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2009, 30(7):1341-1345.
- [9] 李保磊, 傅健, 魏东波, 等. 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 B L, FU J, WEI D B, *et al.*. Determination of rotation center in industrial computed tomography system[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2009, 24(7):1544-1548.
- [10] OSTU N. A threshold selection method from gray-level histogram[J]. *IEEE Trans. Systems Man Cybernet*, 1979, 9:62-66.

作者简介:



李保磊(1980—),男,山东菏泽人,博士,2003年、2009年于北京航空航天大学分别获学士、博士学位,现为公安部第一研究所、北京大学数学科学学院博士后,主要从事X射线数字成像、计算机断层成像技术的研究。E-mail: bao-lei_li@yahoo.com.cn



张耀军(1960—),男,江苏宿迁人,研究员,1983年于浙江大学获学士学位,主要从事X射线安全检查技术的研究。E-mail: zhangyj@fiscan.cn