

文章编号 1004-924X(2013)07-1659-07

锥束 CT 圆轨迹半覆盖扫描的几何校正

张 峰, 江 桦, 闫 镔*, 魏 星, 李 磊

(信息工程大学 信息工程学院, 河南 郑州 450002)

摘要: 研究了一种高精度的几何校正方法用于对锥束 CT 圆轨迹半覆盖成像进行几何校正。首先, 使用 Otsu 算法分割体模投影中钢球所在的区域, 并计算质心坐标。然后, 采用最小二乘算法对质心进行椭圆拟合, 并根据椭圆参数采用 Cho 的全覆盖几何校正算法计算探测器的旋转角度。最后, 顺时针旋转质心, 求得旋转的角度后, 再次进行椭圆拟合, 并根据得到的椭圆参数采用 Noo 的全覆盖几何校正算法计算除探测器倾斜角之外的所有几何参数。实验结果表明: 探测器旋转角和偏转角的测量精度分别为 0.02° 和 0.01° ; 射线源到探测器和到旋转轴的距离的测量精度分别为 0.05 mm 和 0.01 mm ; 射线源在探测器上投影坐标的计算精度分别为 0.07 mm 和 0.15 mm 。由得到的结果可知, 所提出的校正方法有效地去除了几何伪影的干扰, 满足半覆盖成像图像重建的要求。

关键词: 锥束 CT; 半覆盖扫描; 几何校正; 图像重建

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132107.1659

Geometric calibration for half-cover scanning in circular cone-beam CT

ZHANG Feng, JIANG Hua, YAN Bin*, WEI Xing, LI Lei

(Faculty of Information System Engineering,

Information Engineering University, Zhengzhou 450002, China)

* Corresponding author, E-mail: tom.yan@163.com

Abstract: A high-precision method was investigated to realize the geometric calibration of half-cover scanning in circular cone-beam Computed Tomography (CT). First, projected areas of steel balls were segmented from the background by using the Otsu's method, and the mass centers of balls were calculated. Then, the elliptic functions for mass centers were fitted by the least-square algorithm, and the rotation angle of detector was determined by Cho's geometric calibration method for circular scanning. Finally, the rotated mass centers were fitted as two ellipses, and the rest geometric parameters except the tilted angle of detector were calculated by using Noo's geometric calibration method for circular scanning. Experimental results indicate that the measuring precisions of rotation angle and skew angle for the detector are 0.02° and 0.01° , respectively, the measuring precisions of source-detector-distance and source-object-distance are 0.05 mm and 0.01 mm , respectively; and the calculating precisions of orthogonal projection coordinates of source are 0.07 mm and 0.15 mm . The proposed method depress the geometric artifacts significantly, and can satisfy the demands of high-precision image reconstruction.

Key words: cone-beam CT; half-cover scanning; geometric calibration; image reconstruction

1 引言

锥束 CT 圆轨迹全覆盖成像的应用极为广泛,原因在于:(一)全覆盖成像的几何参数求解算法非常成熟^[1-5],(二)FDK 算法能在锥角小于 10° 时高效率、高质量地提供重建图像^[6]。根据 Tuy 条件^[7],半覆盖扫描满足扇形束圆轨迹成像的精确重建条件,从而可以将横向视野扩展近 1 倍。尽管锥形束圆轨迹半覆盖扫描不满足精确重建的条件;但当锥角较小时,该方法仍然可以给出较好的图像质量,因此具有重大的实用价值。

图像重建是将二维投影数据转换为三维体数据的数学过程,它建立在精确成像几何关系的基础上。因此,几何参数的精确求解(即几何校正)是实现半覆盖成像图像精确重建的前提。此外,几何参数求解的精确程度对厚度测量也起着至关重要的作用^[8-9]。通过文献调研发现,适合高分辨率半覆盖成像的几何校正算法还未见报道,这是因为目前半覆盖成像主要应用在分辨率不高的场合^[10]。一般来说,几何放大比(即射线源到探测器的距离与射线源到旋转轴的距离之比)越低,成像的空间分辨率就越低,几何参数的偏差对重建图像的影响也就越小;反之则越大。

为实现高放大比情况下的半覆盖成像,本文研究了一种高精度的几何校正方法。该方法首先计算校正体模中钢球投影的质心坐标,并使用线性最小二乘算法进行椭圆拟合;然后,采用 Cho^[2]等人提出的方法来求解探测器面内的旋转角,并将所有质心按此角度进行顺时针旋转;最后,对旋转后的质心再次进行椭圆拟合,并采用 Noo^[1]等人提出的算法计算除探测器倾斜角之外的所有几何参数。

2 半覆盖成像的几何参数

2.1 半覆盖成像的系统结构

半覆盖成像有两种系统结构:载物台偏置^[10]与探测器偏置^[11]。载物台偏置是指射线源与探测器保持全覆盖成像时的位置不变,载物台的旋转中心由 O 平移至 O' ,但 O' 的投影不能超出探测器的范围,系统结构的俯视图如图 1 所示。探测器偏置则是射线源与载物台保持全覆盖成像时的位置不变,探测器沿垂直于中心射线的方向平移自身宽度的一半,系统结构的俯视图如图 2 所示。虽然这两种半覆盖成像系统的结构不同,但

成像视野是相同的。

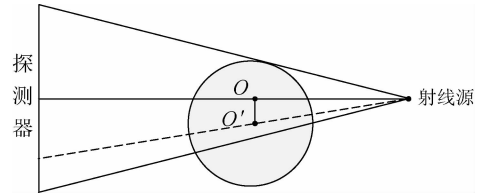


图 1 载物台偏置的半覆盖成像系统

Fig. 1 Half-cover scanning system with displaced turntable

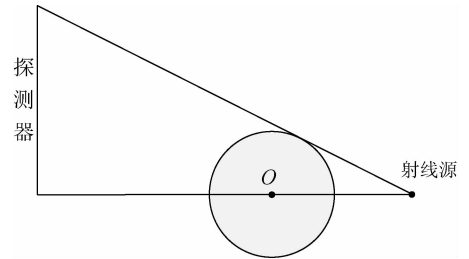


图 2 探测器偏置的半覆盖成像系统

Fig. 2 Half-cover scanning system with displaced detector

2.2 半覆盖成像的几何参数

半覆盖成像的几何关系如图 3 所示,以载物台的旋转轴作为 z 轴建立笛卡尔坐标系, x 轴指向射线源 S 。在该坐标系下需要求解的几何参数包括:(1)探测器的列向量 e_v 与旋转轴投影的夹角 η ,称为旋转角;(2)探测器绕 z 轴的旋转角度

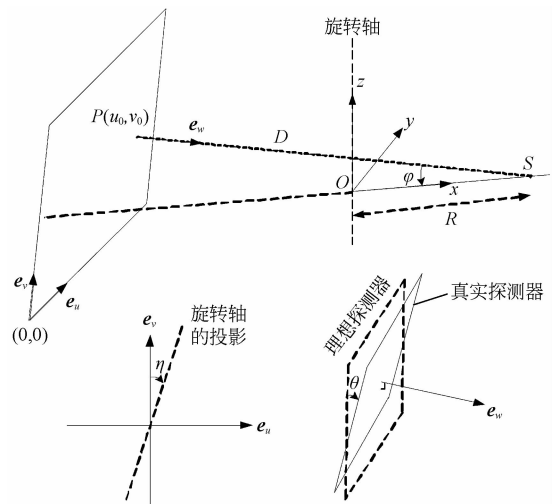


图 3 半覆盖系统成像的几何关系

Fig. 3 Geometry of half-cover scanning system

φ ,称为偏转角;(3)探测器绕 y 轴的旋转角度 θ ,称为倾斜角;(4)射线源到探测器的距离 D ;(5)过射线源作探测器垂线的垂足坐标 (u_0, v_0) ;(6)射线源到旋转轴的距离为 R 。由于 θ 对重建图像质量影响较小,在校正过程中可以忽略^[1,3],因此本文假定 θ 为 0。

文献[1]的校正体模中包含 2 个钢球,在圆轨迹扫描过程中,它们在探测器上形成 2 个椭圆, Noo 正是利用这 2 个椭圆的参数来计算系统的几何参数。但在半覆盖成像中,由于载物台或探测器的偏置,导致这些钢球在某些角度下的投影会超出探测器的范围而无法形成完整的椭圆,使得 Noo 的算法无法计算探测器面内的旋转角。文献[2]中 Cho 的算法虽然可以通过拟合的椭圆参数来计算 η ,但其它参数的求解也需要依赖完整的椭圆这一条件。因此,本文首先采用 Cho 的算法来计算 η ,然后采用 Noo 的算法来计算剩余的几何参数。

2.3 校正体模的设计

本文使用的校正体模如图 4 所示。体模由两个钢球与支撑钢球的有机玻璃支架组成,两个钢球的球心间距为 d ,固定钢球的支架可以在底面的圆盘上更改位置来适应不同放大比的应用场合。在使用过程中,为保证钢球投影质心的计算精度,应选用直径稍大的轴承钢珠(本文选用的钢球直径为 3 mm);并且在采集校正体模的投影时,X 射线源的电压不宜设置过高,只需能明显区分钢球投影与背景即可。此外,为保证射线源到旋转轴的计算精度,两个钢球的球心间距 d 应越精确越好。本文校正体模的加工精度为 25 μm 。

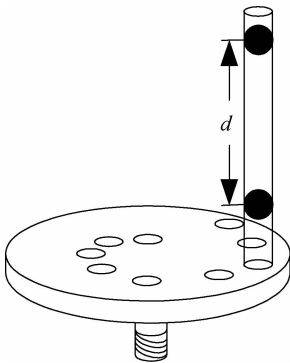


图 4 校正体模

Fig. 4 Calibration phantom

3 半覆盖成像几何校正的关键算法

3.1 质心坐标的计算方法

Otsu 算法^[11]基于类间方差最大准则,是一种全局的非参数无监督阈值分割算法。由于校正体模中钢球对 X 射线高衰减,有机玻璃对 X 射线低衰减,使得钢球投影与背景的区别非常明显。因此,本文采用 Otsu 算法来分割投影中钢球所在区域。

钢球在探测器上的投影是椭圆,但椭圆的中心并不是钢球球心的投影^[13]。为了减小误差,本文使用钢球的质心来近似钢球球心的投影,计算方法为:

$$u = \frac{\sum_{i=0}^{W-1} i \times N(i)}{\sum_{i=0}^{W-1} N(i)} \times \delta_x, v = \frac{\sum_{j=0}^{H-1} j \times M(j)}{\sum_{j=0}^{H-1} M(j)} \times \delta_y, \quad (1)$$

式中: H 和 W 分别为探测器的高度与宽度, $N(i)$ 为第 i 列钢球投影所占的像素数量, $M(j)$ 为第 j 行钢球投影所占的像素数量, δ_x 与 δ_y 分别为探测器上像素的实际尺寸(一般来说,在实际探测器中有 $\delta_x = \delta_y$,即像素是一个小的正方形,单位为 mm)。对圆周上均匀采集的校正体模的 N 个投影按照式(1)进行处理,可以得到上下两个钢球在探测器上投影的质心坐标 (u_i^k, v_i^k) 。其中, $i=0, \dots, N-1$,为投影的编号; $k=1, 2$,分别表示上、下两个钢球。需要注意的是,质心坐标的计算必须以投影图像的左下角为 $(0, 0)$ 点,从而与图 3 定义的坐标系统一。

3.2 椭圆参数的计算方法

对质心坐标 (u_i^k, v_i^k) 使用线性最小二乘算法拟合得到椭圆方程:

$$p_0^k u^2 + v^2 - 2p_1^k u - 2p_2^k v + 2p_3^k uv + p_4^k = 0, \quad (2)$$

式中: p_i^k 为中间变量($k=1, 2; i=0, \dots, 4$)。然后,将式(2)转换为椭圆的一般方程:

$$a_k(u - \bar{u}_k)^2 + b_k(v - \bar{v}_k)^2 + 2c_k(u - \bar{u}_k)(v - \bar{v}_k) = 1, \quad (3)$$

其中,椭圆参数 $a_k, b_k, c_k, (\bar{u}_k, \bar{v}_k)$ 与中间变量 p_i^k 的转换关系参见文献[1],这里不再赘述。

3.3 探测器旋转角的计算方法

利用 Cho 的方法计算 η , 计算公式为:

$$\eta = [P_a^1 A(X^I, L_1) + P_a^2 A(X^I, L_2)] / P_1^2, \quad (4)$$

式中: P_m^n 表示从点 P_m 到点 P_n 的距离, $A(p, q)$ 表示直线 p 和 q 之间的夹角, P_1, P_2 分别为两个椭圆的中心, P_a 为过射线源作 P_1 和 P_2 连线的垂线的垂足. P_a 点坐标 (u_a, v_a) 的计算公式为:

$$\begin{cases} u_a = (\bar{u}_1 + t\bar{u}_2) / (1 + t) \\ v_a = (\bar{v}_1 + t\bar{v}_2) / (1 + t) \end{cases}, \quad (5)$$

其中: $t = \sqrt{a_2/b_2} / \sqrt{a_1/b_1}$. 此外, $A(X^I, L_1), A(X^I, L_2)$ 的计算公式为:

$$\begin{cases} A(X^I, L_1) = \arctan(c_1/b_1) \\ A(X^I, L_2) = \arctan(c_2/b_2) \end{cases}. \quad (6)$$

式中: a_k, b_k, c_k 和 (\bar{u}_k, \bar{v}_k) 分别为式(3)中上下两个椭圆的参数.

值得注意的是, Cho 认为两个椭圆中心的连线与旋转轴线的投影是重合的, 但当旋转轴线的投影偏离探测器上 $v = v_0$ 列时, 椭圆中心的连线与旋转轴线的投影将不再重合, 此时 η 的计算误差会随着旋转轴线投影偏离程度的增大而增大.

当探测器面内的旋转角 η 已知时, 将所有钢球投影的质心坐标按照式(7)进行顺时针旋转, 从而去除 η 的影响.

$$\begin{cases} u_k^{i*} = u_k^i \cos \eta + v_k^i \sin \eta \\ v_k^{i*} = -u_k^i \sin \eta + v_k^i \cos \eta \end{cases}. \quad (7)$$

此时, 再次使用线性最小二乘算法对旋转后的质心坐标 (u_k^{i*}, v_k^{i*}) 进行椭圆拟合, 分别得到两个椭圆的参数 a_k^*, b_k^*, c_k^* 和 $(\bar{u}_k^*, \bar{v}_k^*)$. 然后使用 Noo 的方法计算其它几何参数.

3.4 其它几何参数的计算方法

根据 Noo 的方法, 首先计算射线源到探测器的距离 D , 计算公式为:

$$D^2 = \frac{(a_1^* - 2n_0 n_1) - \epsilon \sqrt{(a_1^*)^2 + 4n_1^2 - 4n_0 n_1 a_1^*}}{2n_1^2}, \quad (8)$$

式中: $n_0 = (1 - m_0^2 - m_1^2) / (2m_0 m_1)$, $n_1 = (a_2^* - a_1^* m_1^2) / (2m_0 m_1)$, m_0 和 m_1 的计算公式为:

$$\begin{cases} m_0 = (\bar{v}_2^* - \bar{v}_1^*) \sqrt{b_2^* - (c_2^*)^2 / a_2^*} \\ m_1 = \sqrt{b_2^* - (c_2^*)^2 / a_2^*} / \sqrt{b_1^* - (c_1^*)^2 / a_1^*} \end{cases}. \quad (9)$$

当两个钢球分别位于 xoy 平面的两侧时, 有 $\epsilon = 1$.

计算探测器的倾斜角 φ , 有:

$$\sin \varphi = -\frac{c_1^*}{2a_1^*} \zeta_1 - \frac{c_2^*}{2a_2^*} \zeta_2, \quad (10)$$

其中: $\zeta_k = D \operatorname{sgn}(z_k) a_k^* \sqrt{a_k^*} / \sqrt{a_k^* b_k^* + (a_k^*)^2 b_k^* D^2 - (c_k^*)^2}$, $\operatorname{sgn}(\cdot)$ 为符号函数.

当 D 已知时, 求得 v_0^* :

$$v_0^* = \bar{v}_1^* - \frac{\operatorname{sgn}(z_1) \sqrt{a_1^* + (a_1^*)^2 D^2}}{\sqrt{a_1^* b_1^* - (c_1^*)^2}}. \quad (11)$$

下一步计算参数 u_0^* , 公式为:

$$u_0^* = \frac{1}{2} \bar{u}_1^* + \frac{1}{2} \bar{u}_2^* + \frac{c_1^*}{2a_1^*} (\bar{v}_1^* - v_0^*) + \frac{c_2^*}{2a_2^*} (\bar{v}_2^* - v_0^*). \quad (12)$$

将 (u_0^*, v_0^*) 以探测器的左下角为原点逆时针旋转 η 角度, 即可得到参数 (u_0, v_0) . 至此得到了锥束 CT 圆轨迹半覆盖扫描的全部几何参数. 基于上述几何参数, 本文首先对采集的投影按照公式(7)顺时针旋转角度 η , 然后采用偏心 FDK 算法^[14]进行图像重建.

4 测量实验与结果

4.1 仿真实验

为验证本文方法求解半覆盖扫描几何参数的精度, 首先在计算机上模拟生成校正体模的投影, 然后采用本文方法计算几何参数, 并与真值进行对比. 实验参数为: 探测器的宽与高为 400 mm \times 300 mm; 在 360° 范围内均匀采集校正体模的 180 个投影; 其它参数设置见表 1 中的真值. 针对载物台偏置和探测器偏置的半覆盖成像系统, 采用本文方法计算系统的几何参数, 实验结果如表 1 所示. 从表 1 可以看出, 对于这两种半覆盖成像系统, 本文方法计算的几何参数的精度非常高. 总体上, 探测器偏置情况下的参数求解精度比载物台偏置时高, 这是由于载物台偏置时旋转轴的投影偏离探测器上 $v = v_0$ 列较大, 从而导致 η 角的计算误差变大引起的 (具体分析参见 3.3 节). 因此, 本文建议在实际应用中采用探测器偏置的半覆盖扫描方式.

表 1 仿真实验的校正结果

Tab. 1 Calibration results of numerical simulation

几何参数	载物台偏置		探测器偏置	
	真值	本文方法	真值	本文方法
$\eta/(\circ)$	2	2.02	2	1.99
$\varphi/(\circ)$	-8	-7.99	-1	-0.99
D/mm	1 400	1 399.95	1 400	1 399.99
v_0/mm	150	150.15	150	149.99
u_0/mm	200	199.93	5	5.02
R/mm	150	149.99	150	149.99

4.2 实际数据实验

受实际实验条件的限制,本文仅通过开展载物台偏置的半覆盖成像实验来验证算法的有效性。依据仿真实验的结论,如果该实验获取的重建图像中无几何伪影,那么本文方法也适用于探测器偏置的半覆盖成像。采集校正体模投影的实验参数为:探测器的宽与高为 2 304 pixel \times 3 200 pixel,像素尺寸为 0.127 mm \times 0.127 mm;射线源的管电压与管电流分别为 90 kV、200 μA ;几何放大比设置为 8 倍左右;在 360 $^\circ$ 内均匀采集 180 个投影;机械系统设置参数如表 2 所示。

首先使用 Otsu 算法分割获得的校正体模钢球投影所在区域,然后利用本文方法计算钢球投影的质心坐标,结果如图 5 所示。

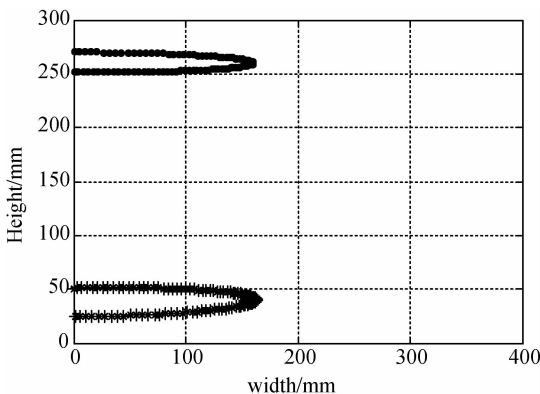


图 5 校正体模中钢球投影的质心

Fig. 5 Mass centers of projections of steel ball positioned on calibration phantom

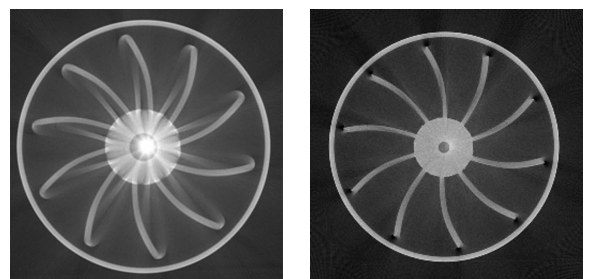
用本文方法计算系统的几何参数,其结果如表 2 所示。

表 2 实际系统的校正结果

Tab. 2 Calibration results of laboratory CT

几何参数	设定值	本文方法
$\eta/(\circ)$	0	-0.42
$\varphi/(\circ)$	-8	-7.90
D/mm	1 400	1 412.90
v_0/mm	150	166.91
u_0/mm	200	214.30
R/mm	200	193.23

在该系统的同一位置对涡轮增压器叶轮进行半覆盖扫描,实验参数为:射线源的管电压与管电流分别为 140 kV 与 200 μA ;360 $^\circ$ 内均匀采集增压器叶轮的 540 个投影;重建矩阵为 2 560 \times 2 560 \times 32(分别对应 X,Y,Z 3 个方向),尺寸为 30 μm \times 30 μm \times 30 μm 。采用表 2 中的“设定值”与“本文方法”对应的几何参数分别进行重建,重建图像中 Z 轴方向第 16 层切片如图 6 所示。图中,校正前的图像对应设定值的重建结果,校正后的图像对应本文方法的重建结果。对校正前与校正后的图像可知,校正前图像中叶轮的尺寸较大,这是因为采用设定值算得的几何放大比比真实值小;校正前的叶轮外壁仍然保持圆形,但叶轮的叶片却变得模糊,这是由于几何参数上的偏差会使物体在重建图像的俯视图中朝着圆圈方向扩散(如一根金属丝会扩散成一个圆),但叶轮外壁本身即为圆,所以仍然保持“圆”的形状。实验结果表明:本文方法求解的几何参数满足高精度成像的要求,重建图像清晰、对比度高、无几何伪影干扰。



(a)校正前的图像 (b)校正后的图像
(a)Uncorrected image (b)Corrected image

图 6 增压器叶轮的半覆盖扫描重建图像

Fig. 6 Reconstruction images of supercharger impeller in half-cover scanning

5 结 论

本文借鉴全覆盖圆轨迹成像的几何校正算法,提出了一种适合半覆盖成像的高精度几何参数求解算法。仿真实验表明,该算法在载物台偏置和探测器偏置这两种半覆盖成像结构下均能求得非常精确的几何参数。各参数的测量精度分别为 $0.02^\circ/0.01^\circ(\eta)$, $0.01^\circ/0.01^\circ(\varphi)$, $0.05/0.01\text{ mm}(D)$, $0.15/0.01\text{ mm}(v_0)$, $0.07/0.02\text{ mm}(u_0)$,

$0.01/0.01\text{ mm}(R)$ 。受探测器旋转角测量误差的影响,载物台偏置时的测量精度比探测器偏置时稍低,因此,在本文建议实际工作中采用探测器偏置的半覆盖成像结构。实验结果表明,经本文方法校正后的重建图像中无几何伪影干扰,图像质量较高,满足高分辨率半覆盖成像的需求。

螺旋扫描是解决长物体问题的有效途径,下一步工作将围绕锥束 CT 螺旋半覆盖扫描的几何校正方法展开,以解决实际中长物体需要分段扫描的难题。

参考文献:

- [1] NOO F, CLACKDOYLE R, MENNESSIER C, *et al.*. Analytic method based on identification of ellipse parameters for scanner calibration in cone-beam tomography [J]. *Physics in Medicine and Biology*, 2000, 45(11): 3489-3508.
- [2] CHO Y, MOSELEY D J, SIEWERDSEN J H, *et al.*. Accurate technique for complete geometric calibration of cone-beam computed tomography systems[J]. *Medical Physics*, 2005, 32(4): 968-983.
- [3] WU D F, LI L, ZHANG L, *et al.*. Geometric calibration of cone-beam CT with a flat-panel detector[C]. *IEEE Nuclear Science Symposium Conference, Valencia, Spain: NSS/MIC*, 2011: 2952-2955.
- [4] KYRIAKOU Y, LAPP R M, HILLEBRAND L, *et al.*. Simultaneous misalignment correction for approximate circular cone-beam computed tomography [J]. *Physics in Medicine and Biology*, 2008, 53(22): 6267-6289.
- [5] 李保磊, 张耀军. X 射线 CT 系统投影旋转中心的测量[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(5): 967-971.
LI B L, ZHANG Y J. Measurement of center of rotation for projection in X-ray computed tomographic system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(5): 967-971. (in Chinese)
- [6] FELDKAMP L, DAVIS L C, KRESS J W. Practical cone-beam algorithm [J]. *Journal of the Optical Society America A*, 1984, 1(6): 612-619.
- [7] TUY H K. An inversion formula for cone-beam reconstruction [J]. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 1983, 43(3): 546-552.
- [8] 刘丰林, 乔桂锋, 邹斌. 工业 CT 图像圆精确测量 [J]. *光学精密工程*, 2009, 17(11): 2842-2848.
- [9] LIU F L, QIAO G F, ZOU B. Precise measurement of circles in industrial computed tomographic images[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(11): 2842-2848. (in Chinese)
- [9] 陶李, 王珏, 邹永宁, 等. 改进的 Zernike 矩工业 CT 图像边缘检测[J]. *中国光学*, 2012, 5(1): 48-56.
TAO L, WANG J, ZOU Y N, *et al.*. Improved Zernike moment method for industrial CT image edge detection [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(1): 48-56. (in Chinese)
- [10] 邹晓兵, 曾理. 锥束螺旋 CT 半覆盖扫描重建[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(2): 434-442.
ZOU X B, ZENG L. Half-cover scanning and reconstructing for helical cone-beam CT [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(2): 434-442. (in Chinese)
- [11] LI L, CHEN Z Q, ZHANG L, *et al.*. A cone-beam tomography system with a reduced size planar detector: a backprojection-filtration reconstruction algorithm as well as numerical and practical experiments[J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2007, 65(9): 1041-1047.
- [12] OTSU N. A threshold selection method from gray-level histogram [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetic*, 1979, 9(1): 62-66.
- [13] 杨氏, 刘静华, 李保磊, 等. 三维显微 CT 扫描系统的 X 射线源焦点投影坐标测量方法[J]. *光学学报*, 2009, 29(5): 1275-1280.
YANG M, LIU J H, LI B L, *et al.*. Measurement method of X-ray focus projection coordinates of three-dimensional micro-computerized tomography scanning system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(5): 1275-1280. (in Chinese)
- [14] GUO J Q, ZENG L, ZOU X B. An improved half-

covered helical cone-beam CT reconstruction algorithm based on localized reconstruction filter[J].

Journal of X-Ray Science and Technology, 2011, 19(3): 293-312.

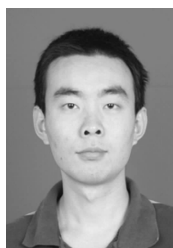
作者简介:



张 峰(1986—),男,四川广安人,博士研究生,2008年,2011年于信息工程大学分别获得学士、硕士学位,主要从事CT图像重建与数据校正的研究。E-mail: xxgcyzf2008@163.com



闫 斌(1976—),男,河南内黄人,副教授,硕士生导师,1999年于信息工程学院获得学士学位,2002年于电子工程学院获得硕士学位,2005年于中科院高能物理研究所获得博士学位,主要从事CT成像技术及应用的研究。E-mail: tom.yan@gmail.com



魏 星(1989—),男,河北石家庄人,硕士研究生,2011年于信息工程大学获得学士学位,主要从事CT图像数据校正的研究。E-mail: chinasat1989@gmail.com



李 磊(1981—),男,河北邢台人,讲师,博士研究生,2003年,2006年于信息工程大学分别获得学士、硕士学位,主要从事双能CT成像技术的研究。E-mail: aerolite_l@yahoo.com.cn

导师简介:



江 桦(1956—),男,江苏南通人,教授,博士生导师,1976年于工程技术学院获得学士学位,1986年于华南理工大学获得硕士学位,1999-2000年在美国罗德岛州立大学做高级访问学者,主要从事信号与信息处理。E-mail: langzicjx@gmail.com

(版权所有 未经许可 不得转载)