基于球投影的面阵探测器扭转角测量与校正

高海东 杨 民 魏东波 孟凡勇

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191) (中国科学院 过程工程研究所, 北京 100190)

摘 要: 为了消除基于面阵探测器的锥束 X 射线计算机断层成像(XCT,X-ray Computed Tomography)检测系统中探测器的安装误差对重建断层图像的影响,使投影坐标系准确建立,并与重建坐标系精确配准,提出了基于椭圆拟合的平板探测器位姿参数的估计方法. 并在此基础上,从锥束 XCT 的近似重建算法 FDK(Feldkamp)出发,结合空间坐标变换原理,改进了重建算法中投影地址的计算方式,使之能在存在安装误差的情况下准确计算投影地址,重建出正确的断层图像. 该方法简单有效,计算量小,无需对系统硬件进行调整. 实验结果表明,利用该方法可以有效地消除由于探测器位姿引起的图像伪影.

关 键 词: 锥束扫描; 探测器位姿; 椭圆拟合; FDK 重建算法

中图分类号: TP 391

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2012)12-1657-04

Detector pose measurement and correction methods for FPD-based cone-beam XCT system

Gao Haidong Yang Min Wei Dongbo

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

Meng Fanyong

(Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China)

Abstract: To eliminate the artifacts in computed tomography (CT) images caused by the flat plane detector (FPD) pose error in cone-beam X-ray CT (XCT) testing system, methods of error measurement and correction were proposed. The ellipse fitting method based on the least squares technique was used to get the detector pose error which is essential for projection coordinate establishing and matching with the reconstruction coordinate accurately. The correction method improves the original Feldkamp (FDK) reconstruction algorithm in the calculation of projection address based on the spatial coordinate transformation theory by which the projection address could be calculated correctly. The methods are of less computation consuming and without hardware calibration. The experimental result proves that the methods could eliminate the artifacts effectively and help reconstruct CT image with high accuracy.

Key words: cone-beam scanning; detector pose; ellipse fitting; FDK reconstruction algorithm

近些年来,随着计算机技术的飞速发展和面阵探测器的出现,锥束 X 射线计算机断层成像(XCT,X-ray Computed Tomography)技术日益成为现代无损检测(NDT,Non-Destructive Testing)领域内的研究热点[1-3]. 锥束 XCT 技术因其扫描效率高的优势得到了快速发展,并成功的应用到飞机涡轮叶片与火箭发动机等领域的无损检测. 锥束 XCT 系统利用 Radon 正逆变换对进行重建成像[4],这就要求重建坐标系与扫描投影坐标系保持一致,吻合的程度直接影响重建 CT 图像的质

收稿日期: 2011-08-23; **网络出版时间**: 2012-11-29 11:05

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20121129.1105.023.html

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60872080,61077011); 多相复杂系统国家重点实验室开放课题资助项目(MPCS-2011-D-03); 国家科技支撑资助项目(2011BAI02B02)

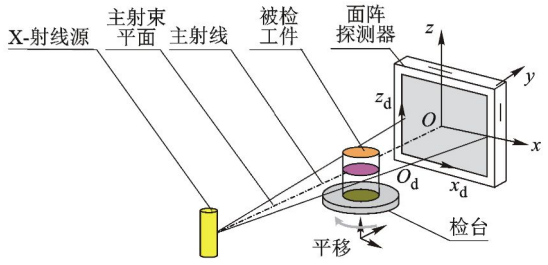
作者简介: 高海东(1985-),男,河北保定人,硕士生, haidong240236@126.com.

量[5]. 但在实际系统中,探测器不可避免地存在安装误差,导致扫描投影坐标系偏离重建坐标系,影响着最终反投影地址的计算精度,造成重建图像出现伪影,丢失图像细节,影响检测结果. 因此,对锥束 XCT 系统重建几何坐标系进行准确标定,是开展工业 CT 成像研究一项基础而又十分关键的工作. 文献[5]提出了 XCT 系统的 6 个几何坐标配准参数,其中关于探测器的几何配准参数有:探测器绕中间行旋转角 η、探测器绕中间列旋转角 ξ 及探测器绕中心射线的扭转角 α,并针对上述 3 个配准参数进行了数值模拟实验,发现探测器的扭转角对重建图像的影响最大,产生了严重的伪影. 本文针对探测器扭转角 α,提出基于球投影椭圆轨迹的测量与校正方法,使重建坐标系达到 Radon 变换对的要求,消除重建伪影,保证重建 CT 图像的准确性.

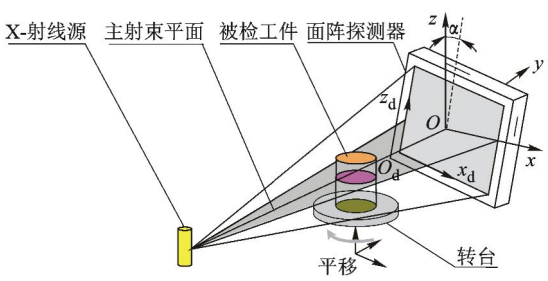
1 探测器扭转角 α 测量

1.1 探测器位姿分析

FDK(Feldkamp)重建算法是目前锥束 XCT 成像技术的主流重建算法[6]. FDK 重建算法是在图 1a 中射线源和探测器构造的重建坐标系 $Oxyz$ 中进行的,探测器的投影坐标系为 $x_dO_dz_d$,算法理论上要求两个坐标系的关系为:O_dz_d 轴平行于 Oz 轴,O_dx_d 轴平行于 Ox 轴. 然而在实际的锥束 XCT 系统安装中,不可避免地存在机械安装误差,导致 O_dz_d 轴不平行于 Oz 轴,O_dx_d 轴不平行于 Ox 轴,相当于坐标系 $x_dO_dz_d$ 绕 y 轴旋转了一定的角度,该角度为探测器的扭转角 α,如图 1b 所示. 扭转角α的存在将给重建断层图像带来伪影[7],造成断层图像发生形变,甚至导致特征信息丢失,影响图像的分辨力和细节的有效检出.



a 锥束 XCT 扫描示意图



b 探测器扭转角

图 1 投影与重建坐标系示意图

1.2 扭转角 α 测量方法

本文测量探测器扭转角 α 的方法原理如图 2 所示. xOz 为理想状态下不存在安装误差的重建坐标系,$x_dO_dz_d$ 为探测器存在安装误差扭转角 α 的探元坐标系,标志点 P 为非中心射束平面的空间一点,点 P 在转台的带动下绕转轴旋转. 点 P 在探测器上的投影轨迹为曲线 C,由检测系统的特性可知,曲线 C 呈现近似椭圆状. MN 为该椭圆长轴所在的直线,直线 l 与探测器坐标系的 O_dx_d 轴平行,直线 MN 与直线 l 的夹角即为探测器的扭转角 α.

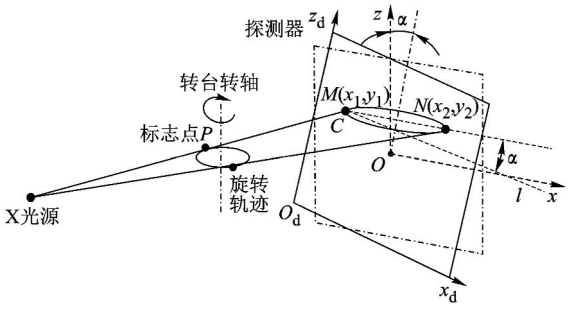


图 2 探测器扭转角 α 测量原理图

令点 P 第 i 帧投影坐标为 $p_i(x_{d-i},z_{d-i})$,采集点 P 的多帧投影得到点集 $Q=\{p_i(x_{d-i},z_{d-i})\}$,对点集 Q 进行椭圆拟合求出探测器的扭转角 α. 常用的椭圆拟合方法主要有 3 类:基于最小二乘的拟合法[8]、基于不变矩的方法[9]以及基于 HOUGH 变换的椭圆拟合方法[10]. 基于最小二乘的椭圆拟合方法适用性强,是曲线拟合常用方法. 本文拟选择基于对称性的最小二乘法拟合椭圆方程,进而求出长轴与坐标轴的夹角. 椭圆存在 2 条正交对称轴,其边界上至少存在 2 个点其外法线方向相反,这 2 个点互为对偶点,对偶点具有平移、旋转、缩放不变性[11]. 基于椭圆的上述特性,对拟合点的采样进行优化,避免传统算法的大量无效采样,降低椭圆拟合的计算量. 对点集 Q,利用对偶点切线方向相同的性质选取对偶点,增大采样点落在同一个椭圆上的概率,得到采样点集 Q',Q'满足 $Q'\subseteq Q$.

椭圆的一般方程为

$$ax^2+bxy+cy^2+dx+ey+f=0 \quad (1)$$

令向量 $\boldsymbol{\beta}=[x^2,xy,y^2,x,y]$,则椭圆方程为

$$f(Q',\alpha)=\boldsymbol{\beta}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\theta}=$$
$$ax^2+bxy+cy^2+dx+ey+f=0 \quad (2)$$

向量 $\boldsymbol{\theta}=[a,b,c,d,e,f]$ 决定了椭圆的形状参数,通过最小二乘拟合来寻找适合的参数向量 $\boldsymbol{\theta}$,使

各点到候选椭圆边缘的距离平方和最小. 一般椭圆的 5 个参数描述为:$S=\{A,B,X_c,Y_c,\alpha\}$. 其中 A,B 表示半轴长,(X_c,Y_c) 表示中心坐标,$\alpha(-\pi/2<\alpha<\pi/2)$ 表示长轴与坐标轴正向的夹角. 利用坐标的平移及旋转关系,得出 α 与 $\boldsymbol{\theta}=[a,b,c,d,e,f]$ 的关系:

$$\alpha=\frac{1}{2}\arcsin\frac{b}{a+c} \tag{3}$$

在上述思想的指导下,实验过程中可用钢珠在探测器成像平面 $x_dO_dz_d$ 上的投影质心代替标志点 P,第 i 帧投影质心(x_{d-i},z_{d-i})的计算方法为

$$\left.\begin{aligned}x_{d-i}&=\frac{\sum_{x_d=1}^{m}\sum_{z_d=1}^{n}x_d\times f(x_d,z_d)}{\sum_{x_d}\sum_{z_d}f(x_d,z_d)}\\ z_{d-i}&=\frac{\sum_{x_d=1}^{m}\sum_{z_d=1}^{n}z_d\times f(x_d,z_d)}{\sum_{x_d}\sum_{z_d}f(x_d,z_d)}\end{aligned}\right\} \tag{4}$$

式中,m,n 为投影图像尺寸;$f(x_d,z_d)$ 为坐标(x_d,z_d)处的投影值. 综上所述,探测器位姿参数测算方法的流程为:采集多帧钢珠投影 Q,利用式(4)求取每个钢珠投影的质心坐标(x_{d-i},z_{d-i}),根据钢珠投影质心坐标采用基于对称性的最小二乘法进行椭圆拟合,得到椭圆参数向量 $\boldsymbol{\theta}$,利用式(3)求得探测器的扭转角 α.

2　校正方法

由于探测器的安装误差,导致探测器并非水平竖直,从而造成重建图像伪影,在这种情况下需要进行校正. 如图 3 所示为引入探测器扭转角 α 锥束 XCT 重建坐标系统示意图.

锥束射线视为沿 z 轴方向不同倾斜角度的扇束射线堆积而成,中心平面 sOt 上的数据重构属于扇束 FBP(Filtered Backprojection)精确重建,对于非中心平面的重建,通过对扇束 FBP 重建公式进行修正,得到 FDK 重建公式. 设待重建衰减系数分布函数为 $f(s,t,z)$,视角 β 下的投影值表示为 $p(s,z,\beta)$. 物体的衰减系数分布 $f(s,t,z)$ 可由锥束射线扫描 FDK 算法表示为

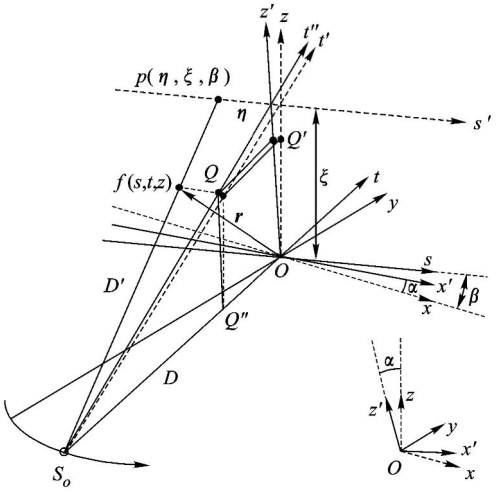
$$f(s,t,z)=\int_0^{2\pi}\frac{1}{U^2}\tilde{p}^{\,e}(s_1,z_1,\beta)\,\mathrm{d}\beta \tag{5}$$

式中 $\tilde{p}^{\,e}(s,z,\beta)$ 为滤波后的等效投影,有

$$\tilde{p}^{\,e}(s,z,\beta)=p^{e}(s,z,\beta)\otimes h(s)/2 \tag{6}$$

$h(s)$ 为斜坡卷积函数;$p^{e}(s,z,\beta)$ 为等效投影:

$$p^{e}(s,z,\beta)=p(s,z,\beta)\frac{D}{\sqrt{D^2+s^2+z^2}} \tag{7}$$



$Oxyz$—精确的重建坐标系;$Ox'yz'$—引入探测器扭转角 α 的重建坐标系;$Ostz$—旋转坐标系;D—焦点与探测器的距离;待重建点 $f(s,t,z)$ 在视角 β 下的投影值为 $p(\eta,\xi,\beta)$,其中 η,ξ 为投影地址.

图 3　FDK 重建算法坐标系统

令(s_1,z_1)为经过待重建点(s,t,z)的射线与探测器的交点,U 为加权因子,由图 3 所示几何关系,引入探测器扭转角 α,则有

$$s_1=\frac{Ds}{D-t} \tag{8}$$

$$z_1=\frac{Dz}{D-t} \tag{9}$$

$$U=\frac{D-t}{D} \tag{10}$$

其中

$$s=x\cos\beta\cos\alpha+y\sin\beta\cos\alpha+z\sin\alpha \tag{11}$$

$$t=-x\sin\beta+y\cos\beta \tag{12}$$

当探测器扭转角 $\alpha=0^\circ$ 时,式(8)~式(10)退化为原始方法计算的投影地址.

由于上述方法改善了投影地址的计算,使反投影过程更加准确,从而消除了探测器扭转角对重建图像的影响.

3　实验结果

3.1　探测器扭转角测量

实验条件:钢珠直径 $d=10$ mm 置于转台上,焦距 $D=1\,200$ mm,转台距探测器 200 mm,钢珠距转台中心 $d=75$ mm,高度 $h=57$ mm,探测器尺寸为 1 920×1 536 像素,探元尺寸:0.127 mm/像素,采集投影 180 帧. 采用 1.2 节方法测量扭转角,拟合得参数向量 $\boldsymbol{\theta}$ 各元素:

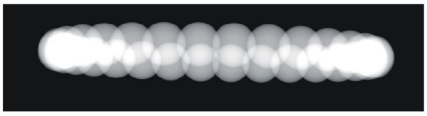
$$a=2.2175\times10^{-6}\qquad b=2.6572\times10^{-5}$$

$$c=5.8327\times10^{-4}\qquad d=0.0308$$

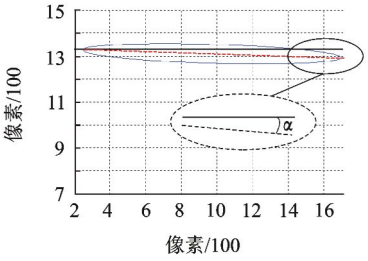
$$e=1.5269\qquad f=1.0003\times10^{3}$$

由式(3)可得长轴与 O_dx_d 轴的夹角为:$\alpha=$

0.022 7 rad,换算成角度为 1.300 6°,即扭转角 α=1.300 6°. 图 4a 所示为取对数后钢珠叠加投影. 图 4b 所示为投影质心轨迹,虚线为椭圆长轴所在直线,实线与探测器的 $O_d x_d$ 平行,放大部分示意椭圆长轴与探测器坐标轴的夹角 α.



a 钢珠投影叠加



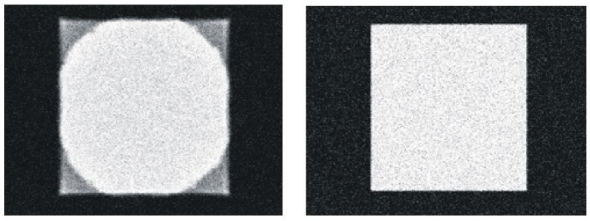
b 投影质心轨迹

图 4 探测器位姿参数测算结果

3.2 重建校正

利用上述得到的探测器扭转角,通过第 2 节改进的 FDK 重建算法进行校正. 实验条件:射线源焦点尺寸 0.2 mm,管电压 150 kV,管电流 2 mA,焦距 D=1 200 mm,转台距探测器 200 mm,探测器探元尺寸 0.127 mm,被检对象为 50 mm×50 mm×100 mm 的 Al,采集投影 360 幅.

图 5a 所示为利用原始 FDK 重建算法重建第 30 层得到的断层图像,图 5b 为在计入探测器扭转角之后利用本文方法校正得到的重建断层图像. 改进算法对探测器的扭转角进行了有效校正,使得反投影地址得以精确计算,消除了由于探测器扭转角产生的伪影. 对比图 5a 与图 5b 可以发现,由探测器扭转角引起的图像边缘模糊得到了很好的校正,断层图像的直角特征得到了保留.



a 校正前 b 校正后

图 5 校正前后重建断层图像对比

4 结束语

本文讨论了锥束 XCT 扫描系统中投影坐标系与重建坐标系的配准问题,针对探测器的安装误差,提出了基于球投影的探测器扭转角的测量方法,并在三维锥束 FDK 重建算法的基础上,结合空间坐标变换原理,推导了相应的校正方法. 校正结果表明了扭转角测量结果及重建断层图像的准确性. 本文方法在实现过程中,为保证测量和校正精度,需要多帧标志点的投影,另外探测器安装误差的扭转角的旋转中心也需要正确标定,否则会导致校正效果不佳甚至重建图像错误.

参考文献(References)

[1] Roberts J A, Drage N A, Davies J. Effective dose from cone beam CT examinations in dentistry[J]. British Journal of Radiology, 2009, 82(973): 35-40

[2] Yan Guorui, Tian Jie, Zhu Shouping, et al. Fast cone-beam CT image reconstruction using GPU hardware[J]. Journal of X-Ray Science and Technology, 2008, 16: 225-234

[3] Periago D R, Scarfe W C, Moshiri M, et al. Linear accuracy and reliability of cone beam CT derived 3-dimensional images constructed using an orthodontic volumetric rendering program[J]. Angle Orthodontist, 2008, 78(3): 387-395

[4] Jiang Hsieh. 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: 27-65
Jiang Hsieh. Computed tomography principle, design, artifacts and recent advance[M]. Beijing: Science Press, 2006: 27-65 (in Chinese)

[5] 侯颖. 锥束 XCT 的定标方法研究[D]. 大连:大连理工大学信息与通信工程学院, 2010: 28-42
Hou Ying. Research on calibration method in cone-beam XCT [D]. Dalian: School of Information and Communication Engineering, Dalian University of Technology, 2010: 28-42 (in Chinese)

[6] Miao Hui, Wang Tingting, Zhao Huijuan, et al. Improvement based on FDK reconstruction algorithm of conebeam CT[C]// Proc of SPIE. Belingham: SPIE, 2010, 7570: 1-7

[7] 戎军艳. 锥束微 CT 系统伪影校正与性能测试[D]. 北京:中国科学院高能物理研究所, 2009: 62-64
Rong Junyan. Artifacts correction and performance tests of cone beam micro-CT system [D]. Beijing: Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Science, 2009: 62-64 (in Chinese)

[8] 邹益民, 汪渤. 一种基于最小二乘的不完整椭圆拟合算法[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(7): 808-812
Zou Yimin, Wang Bo. Fragmental ellipse fitting based on least square algorithm[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(7): 808-812 (in Chinese)

[9] Mehmet Ali Aktas. Measuering shape ellipticity[J]. Computer Analysis of Image and Patterns, 2011, 6854: 170-177

[10] Hu Xinyu, Chen Zuobing, Zhang Daode, The application of randomized hough transform in ellipse image detection[J]. Advanced Material Research, 2010, 159: 388-392

[11] 吕洪赫, 姚振杰, 易卫东. 基于对称性的最小二乘拟合随机椭圆检测法[J]. 电子测量技术, 2011, 34(5): 37-41
Lü Honghe, Yao Zhenjie, Yi Weidong. Random least square fitting elliptic detection algorithm based on symmetry[J]. Electronic Measurement Technology, 2011, 34(5): 37-41 (in Chinese)

(编 辑:文丽芳)