

一种改进的三维 CT 系统射线源焦点 投影坐标测量方法

李兴东¹ 杨 民² 李德红¹ 刘文丽¹

(¹中国计量科学研究院, 北京 100013
²北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100191)

摘要 射线源焦点投影坐标是影响三维 CT 重建精度的重要几何参数,而在实际的三维 CT 成像系统中该参数不能直接精确测量得到。提出了一种改进的射线源焦点投影坐标精确测量方法。对单圆球目标体在锥束射线场不同位置进行多次成像,对相关联的数字化 X 射线摄影(DR)图像进行分组,提取每组两个圆球目标体 DR 投影的质心坐标,然后构造超定方程组,从而求解出射线源焦点投影坐标。实验结果表明,该方法回避了现有方法对投影椭圆度的要求,具有更高的测量精度,并且实现简单、具有较强的抗噪能力。

关键词 成像系统;锥束 CT;几何标定;焦点投影坐标;超定方程

中图分类号 TP391 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201131.1212004

Improved Measurement Method for X-Ray Focus Projection Coordinates of 3D-CT Scanning System

Li Xingdong¹ Yang Min² Li Dehong¹ Liu Wenli¹

(¹National Institute of Metrology, Beijing 100013, China
²School of Mechanical Engineering and Automation,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract X-ray focus projection coordinates are the important geometrical parameters for three-dimensional (3D) CT reconstruction. But for practical 3D-CT scanning system, it is impossible to measure the position of the X-ray focus projection by direct means. An improved method to measure the X-ray focus projection coordinates with high accuracy is proposed. Through acquiring digital radiographic (DR) images of the single ball object at different positions in the cone X-ray beam, the DR images are combined to several groups which include two correlative DR images. Image processing methods are used so as to get the centroid of each projection of the ball object at different position and then to construct an over-determined equation set. By solving the over-determined equation set, the X-ray focus projection coordinates are finally obtained. The experimental results prove that the improved method is free of the severe requirements of the elliptical projection shape according to the existing method, and the accuracy of this method can satisfy the requirements of the practical scanning systems, meanwhile it is easy to realize and of high anti-noise ability.

Key words imaging systems; cone beam CT; geometrical calibration; focus projection coordinates; over-determined equation

OCIS codes 110.6960; 340.7440; 110.7440

1 引 言

近年来,随着计算机技术的飞速发展和面阵探测器件的出现,三维(3D)CT 日益成为无损检测(NDT)

领域内的研究热点。在众多的 3D 重建算法中,考虑到运算量和工程实现难度,FDK(Feldkamp-Davis-Kress)类型的算法最为实用^[1,2],也一直是实际工程

收稿日期: 2011-06-01; 收到修改稿日期: 2011-07-21

基金项目: 国家科技支撑项目(2011BAI02B02)和国家自然科学基金(60872080)资助课题。

作者简介: 李兴东(1957—),男,硕士,副研究员,主要从事辐射影像学及其评价方法等方面的研究。

E-mail: lixd5680@sina.com

应用中的主流。该算法要求精确知道射线源焦点在探测器成像面上的投影点的坐标。但在实际的成像系统中,由于射线源焦点和探测器成像平面的准确位置无法直接测量得到,从而使得射线源焦点在成像平面上的投影点的位置难以精确测量。该点坐标的误差会影响重建图像的精度,造成伪影的产生,影响图像的分辨力和细节的有效检出。文献[3~5]提出了非线性最小二乘估计的测量方法,其思想就是计算空间一质点在不同转角下的投影坐标,质点理论投影坐标与实际求得的投影坐标之间应满足误差最小的条件,通过求解满足此条件的非线性最小二乘解,即得到投影坐标原点参数值。非线性最小二乘估计结果受参数向量的初始值影响较大,容易产生病态解。为了克服病态解问题,文献[6]提出了利用夹芯面包板测量投影坐标原点的方法,夹芯面包板由长准直比的准直栅构成,当对面板进行成像时,唯有焦点发出的主射线通过准直栅成像,通过对准直栅数字化 X 射线摄影(DR)图像的灰度分布统计和拟合,计算出射线源焦点投影的位置。该方法测量精度较低,操作起来难度较大。

文献[7]提出了基于双椭圆投影的测量方法,该方法是利用锥束场中圆球的投影为椭圆的原理,通过求解不同椭圆长轴交点坐标来得到射线源焦点投影坐标。在研究中发现,该方法比较适用于显微 3D-CT 系统的射线源焦点投影坐标标定,而对于常规的 3D-CT 系统(即射线源焦点尺寸为亚毫米到毫米级),在实现中存在一定难度:1)受成像放大比和探测器成像面积的限制,不易得到椭圆度很好的 DR 图像;2)对于实际的 CT 系统,射线源为非理想点光源,加上散射、探测器暗电流、探元响应不一致性等因素的影响,使得球体 DR 图像存在噪声和边缘模糊^[8,9],从而加大了椭圆长轴的拟合误差。一旦椭圆长轴拟合有误差,那么它们在远处的交点会产生更大的偏差,因此在实际应用中,仅通过求解两个椭圆长轴的交点,很难保证焦点投影坐标的重复精度。为此,本文提出了一种改进的测量方法,利用单圆球目标体在锥束场不同位置多次成像获得的 DR 图像序列,提取每组两个圆球目标体 DR 投影的质心坐标,然后构造超定方程组,从而求解出射线源焦点投影坐标。

2 测量方法

3D-CT 系统的扫描原理如图 1 所示,射线源焦点发出锥束射线,对扫描台上的被检物体进行透照,

扫描台带动被检物体同步旋转,探测器采集被检物体在不同旋转位置的投影图像,根据探测器采集的投影数据,利用 3D 重建算法反解出被检物体的断层图像。FDK 3D 重建算法要求精确知道射线源焦点(用 P 点表示)在探测器成像面上的投影点 O 的坐标。如图 1 所示,探测器成像面的坐标系为 $X_d O_d Z_d$,当探测器在成像系统中的位置固定后,该坐标系即可确定,其原点 O_d 即为探测器采集的投影图像坐标系原点。标定射线源焦点的投影坐标就是要精确测量 O 点在 $X_d O_d Z_d$ 坐标系下的坐标 (x_o, z_o) ^[7]。

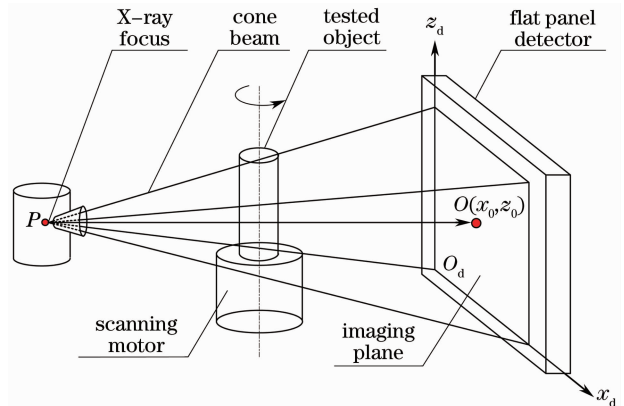


图 1 FDK 算法扫描原理图

Fig. 1 Principle of FDK algorithm

根据文献[7]的理论推导,球状目标体在锥束射线场中的投影为椭圆,那么球体在多个位置投影形成的多个椭圆,其长轴交点必定是射线源焦点的投影。但该方法在实现上存在一定的难度,其核心问题就是如何得到椭圆度较大的球体投影。而对于常规 CT 系统,受成像放大比和探测器成像面积的限制,不易得到椭圆度很好的 DR 图像。图 2 为在北京航空航天大学 160 kV 3D-ICT 实验平台上测得的不同放大比下直径 8 mm 钢珠的投影的椭圆度,可以看出,所

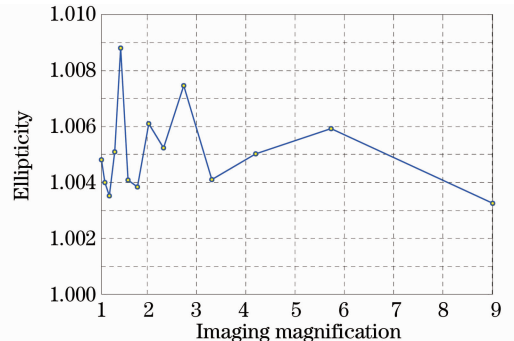


图 2 球目标体不同投影放大比下的投影椭圆度统计

Fig. 2 Projection ellipticity statistics of spherical object under different imaging magnifications

有投影几乎为圆形,椭圆的长短轴之比接近于 1,此时利用文献[7]的方法测量就不易得到精确的结果。实验平台的主要硬件配置为:射线源,德国 YXLON 公司产 MG165/2.25 X 射线源,焦点尺寸 0.4 mm;面阵探测器,美国 Varian 公司产 PaxScan2520 型非晶硅面阵探测器,成像面积为 244 mm×195 mm,探元尺寸为 0.127 mm。

基于上述分析,对文献[7]的方法进行改进,以求取满足一定条件的两个圆投影质心的连线代替文献[7]中求取椭圆长轴方程的步骤,测量原理如图 3 所示。成像系统具有 X_d 向和 Y_d 向平移导轨,且 X_d 向导轨平行于成像平面 $X_dO_dZ_d$, Y_d 向导轨垂直于成像平面 $X_dO_dZ_d$ 。在 X_d 向某一位置 x_{di} 处(即 $X_d=x_{di}$),空间一质点在不同 Y_d 向位置 $y_{d1}, y_{d2}, y_{d3}, \dots, y_{dn}$ 的投影点序列记为 $P_{x_{di}}$:

$$P_{x_{di}} = \{p(y_{d1}), p(y_{d2}), p(y_{d3}), \dots, p(y_{dn}) \mid x_{di} \}, \quad i = 1, 2, 3, \dots$$

理论上可以证明,满足 $X_d=x_{di}$ 条件的投影点序列 $P_{x_{di}}$ 在一条直线上,且该直线经过射线源焦点投影。那么,在 X_d 向不同固定位置,空间质点沿 Y_d 向平移就形成不同的连接投影点的直线,这些直线的交点就是射线源焦点的投影,这便是本文测量方法的理论依据。基于此原理,提出测量方法如下。

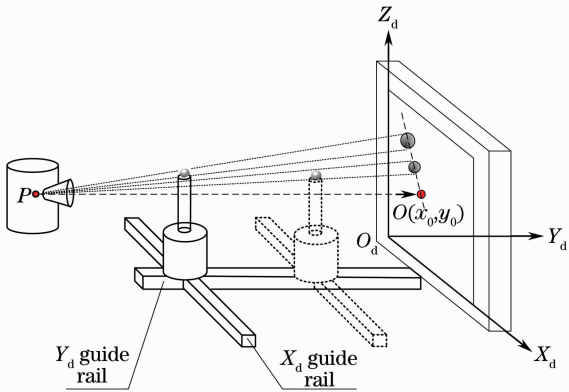


图 3 改进测量算法原理图

Fig. 3 Sketch map of the improved measurement method

扫描台位于射线源与面阵探测器之间的任意位置,将一个球状目标体固定在支撑架上,并连同支撑架安装在扫描台上,如图 3 所示。具体步骤如下:

1) 将扫描台沿 X_d 向和 Y_d 向导轨移动到合适位置,记为 $P_{os_{11}}$,探测器采集球体的 DR 投影,记为 DR_{11} ;

2) 将扫描台沿 Y_d 向导轨移动一定距离 D_1 后到达位置 $P_{os_{12}}$,探测器采集球体的 DR 投影,记为

DR_{12} ;

3) 对 DR 投影 DR_{11} 和 DR_{12} 分别进行阈值分割,然后计算每个圆投影的质心坐标,分别记为 $Q_{11}(x_{11}, z_{11}), Q_{12}(x_{12}, z_{12})$,连接点 Q_{11} 和 Q_{12} ,得到直线方程

$$l_{Q_{11}Q_{12}} : z = \frac{z_{12} - z_{11}}{x_{12} - x_{11}}(x - x_{12}) + z_{11}, \quad (1)$$

4) 将扫描台沿 X_d 向和 Y_d 向导轨移动到另一合适位置 $P_{os_{21}}$,探测器采集球体的 DR 投影,记为 DR_{21} ;

5) 将扫描台沿 Y_d 向导轨移动一定距离 D_2 后到达位置 $P_{os_{22}}$,探测器采集球体的 DR 投影 DR_{22} 。

6) 对 DR 投影 DR_{21} 和 DR_{22} 分别进行阈值分割,然后计算每个圆投影的质心坐标,分别记为 $Q_{21}(x_{21}, z_{21}), Q_{22}(x_{22}, z_{22})$,连接点 Q_{21} 和 Q_{22} ,得到直线方程

$$l_{Q_{21}Q_{22}} : z = \frac{z_{22} - z_{21}}{x_{22} - x_{21}}(x - x_{22}) + z_{21}, \quad (2)$$

7) 重复上述步骤 4,将扫描台沿 X_d 向和 Y_d 向导轨移动到合适位置 $P_{os_{N1}}$,探测器采集球体的 DR 投影 DR_{N1} ;

8) 重复上述步骤 5,将扫描台沿 Y_d 向导轨移动一定距离 D_N 后到达位置 $P_{os_{N2}}$,探测器采集球体的 DR 投影 DR_{N2} ;

9) 重复上述步骤 6,对 DR 投影 DR_{N1} 和 DR_{N2} 分别进行阈值分割,然后计算每个圆投影的质心坐标,分别记为 $Q_{N1}(x_{N1}, z_{N1}), Q_{N2}(x_{N2}, z_{N2})$,连接点 Q_{N1} 和 Q_{N2} ,得到直线方程

$$l_{Q_{N1}Q_{N2}} : z = \frac{z_{N2} - z_{N1}}{x_{N2} - x_{N1}}(x - x_{N2}) + z_{N1}, \quad (3)$$

10) 联立直线 $l_{Q_{11}Q_{12}}, l_{Q_{21}Q_{22}}, \dots, l_{Q_{N1}Q_{N2}}$ 的方程,得到超定方程组

$$\begin{cases} k_1 x + z = b_1 \\ k_2 x + z = b_2 \\ \dots \\ k_N x + z = b_N \end{cases}, \quad (4)$$

即 $A\mathbf{p}=\mathbf{b}$,其中

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} k_1 & 1 \\ k_2 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ k_N & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{z_{12} - z_{11}}{x_{12} - x_{11}} & 1 \\ \frac{z_{22} - z_{21}}{x_{22} - x_{21}} & 1 \\ \vdots & \vdots \\ \frac{z_{N2} - z_{N1}}{x_{N2} - x_{N1}} & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{p} = \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{z_{12} - z_{11}}{x_{12} - x_{11}} \cdot x_{12} - z_{11} \\ \frac{z_{22} - z_{21}}{x_{22} - x_{21}} \cdot x_{22} - z_{21} \\ \vdots \\ \frac{z_{N2} - z_{N1}}{x_{N2} - x_{N1}} \cdot x_{N2} - z_{N1} \end{bmatrix};$$

11) 求解该超定方程组,得到其最小二乘解,即为射线源焦点 P 在成像平面上的投影坐标点 $O(x_0, z_0)$ 。

3 实验验证

为了验证本测量方法的有效性,将安装有外径为 8 mm 钢珠的支撑架固定在 160kV 3D-ICT 扫描系统上,分别进行 8 组测量。实验条件如下:

- 1) 管电压 110 kV,管电流 2.0 mA,射线源焦点到探测器距离 1000 mm;
- 2) 探测器探元尺寸 0.127 mm,成像面积 244 mm×195 mm,输出图像尺寸为 1920 pixel×1536 pixle。扫描系统在安装时,尽可能使射线源的焦点投影位于探测器的中心区域,即源焦点 P 在成像平面上的投影坐标接近(960 pixel,768 pixel);
- 3) 转台沿 X_d 方向每隔 12 mm,探测器采集 8 个位置球状目标体的数字投影图像;
- 4) 转台沿 Y_d 方向移动 190 mm,再沿 X_d 方向每隔 12 mm,探测器采集 8 个位置球状目标体的数字投影图像。

将上述 2 步得到的所有 DR 图像合成为一幅 DR 图像,如图 4 所示。利用图像处理技术,提取每组钢珠投影的质心坐标,两个质心坐标构造一直线方程,那么 8 组数据就构造出 8 条直线方程,8 条直线方程就构造一个超定方程组:

$$\begin{cases} -1.2839x + z = -35.1 \\ -0.9164x + z = 245.2 \\ -0.5602x + z = 523.0 \\ -0.2258x + z = 795.0 \\ 0.1471x + z = 1072.8 \\ 0.5178x + z = 1359.3 \\ 0.8281x + z = 1624.4 \\ 1.2030x + z = 1904.1 \end{cases} \quad (5)$$

求解该方程组,得出射线源焦点 P 在成像平面上的投影坐标为(964.473 pixel,781.941 pixel)。

另外还按照文献[7]提出的方法,将实验验证中第 2 步得到的 8 个 DR 图像合成为一幅 DR 图像,

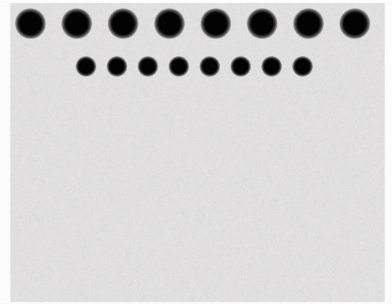


图 4 不同位置的球体投影合成图像
Fig. 4 Image composed of sphere projections at different positions

如图 5 所示。利用图像处理技术,提取每个椭圆的长轴方程,8 个椭圆长轴就构造出一个超定方程组:

$$\begin{cases} -1.2135x + z = -25.8 \\ -0.9199x + z = 243.2 \\ -0.6537x + z = 769.1 \\ 0.0165x + z = 1056.0 \\ 0.4056x + z = 1335.2 \\ 0.9014x + z = 1625.7 \\ 1.2136x + z = 1896.6 \end{cases} \quad (6)$$



图 5 步骤 2 获得的不同位置的球体投影合成图像
Fig. 5 Image composed of sphere projections at different positions in step 2

求解该方程组,得出射线源焦点 P 在成像平面上的投影坐标为(993.0107 pixel,769.0684 pixel)。

利用本文提出的改进方法和文献[7]的方法测量的结果进行了 CT 重建。图 6 和图 7 分别是利用

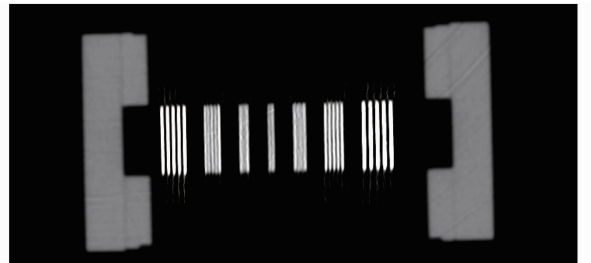


图 6 利用改进方法测量结果的重建图像
Fig. 6 Reconstructed image by using the improved measurement method

(964.473 pixel, 781.941 pixel)和(993.0107 pixel, 769.0684 pixel)对分辨率卡重建的结果,可以看出,本文方法具有更高的重建精度。

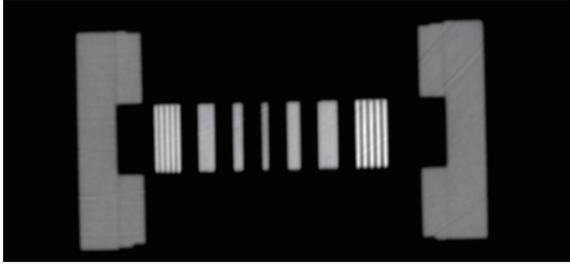


图 7 利用文献[7]方法测量结果的重建图像

Fig. 7 Reconstructed image by using measurement method proposed in Ref. [7]

4 结 论

提出了一种改进的射线源焦点投影坐标测量方法,利用单圆球目标体在锥束场不同位置多次成像获得的 DR 图像序列,提取每组两个圆球目标体 DR 投影的质心坐标,然后构造超定方程组,从而求解出射线源焦点投影坐标。与其他的测量方法相比,该方法具有以下优点:1) 适用于普通焦点和微焦点 3D-CT 系统中射线源焦点投影坐标的标定;2) 采用一个球状目标体多次成像构造超定方程组,求解超定方程组得到最小二乘解,求解坐标值精度达到亚像素级,从而降低了测量中随机误差造成的影响,保证了测量的重复精度;3) 测量方法容易实现,操作简单,只需要将球体在射线源与探测器之间沿导轨移动不同距离成像即可。

参 考 文 献

- 1 L. A. Feldcamp, L. C. Davis, J. W. Kress. Practical cone-beam algorithm[J]. *J. Opt. Soc. Am. A.*, 1984, **1**(6): 612~619
- 2 Li Baolei, Zhang Yaojun. Projection decomposition algorithm of X-ray dual-energy computed tomography based on projection matching[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(3): 0311002
李保磊, 张耀军. 基于投影匹配的 X 射线双能计算机层析成像投影分解算法[J]. *光学学报*, 2011, **31**(3): 0311002
- 3 G. T. Gullberg, B. M. W. Tsui, C. R. Crawford *et al.*. Estimation of geometrical parameters and collimator evaluation for cone beam tomography[J]. *Med. Phys.*, 1990, **17**(2): 264~272
- 4 J. Li, R. J. Jaszczak, H. Wang *et al.*. Determination of both mechanical and electronic shifts in cone beam SPECT[J]. *Phys. Med. Biol.*, 1993, **38**(6): 743~754
- 5 N. Frédéric, C. Rolf, M. Catherine *et al.*. Analytic method based on identification of ellipse parameters for scanner calibration in cone-beam tomography[J]. *Phys. Med. Biol.*, 2000, **45**(11): 3489~3508
- 6 Zhang Quanhong. Optimization Research on X-Ray Industrial CT Imaging[D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2005
张全红. X 射线工业 CT 成像优化研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2005
- 7 Yang Min, Liu Jinghua, Li Baolei *et al.*. Measurement method of X-ray focus projection coordinates of three-dimensional micro-computed tomography scanning system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5): 1275~1280
杨 民, 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
- 8 Li Baolei, Yang Min, Fu Jian *et al.*. Two ring artifact correction methods for computed tomography [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7): 1849~1853
李保磊, 杨 民, 傅 健 等. 两种 CT 成像环状伪影抑制方法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(7): 1849~1853
- 9 Wang Gang, Yang Min. Denoising method to dynamic digital X-ray images and its fast implementation[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2010, **36**(6): 741~744
王 钢, 杨 民. X 射线动态数字图像降噪方法与快速实现[J]. *北京航空航天大学学报*, 2010, **36**(6): 741~744

栏目编辑:李文喆