

## 《工业 CT 图像重建和检测方法》专栏文章导读

重庆大学 光电技术及系统教育部重点实验室 ICT 研究中心 曾理

高精度工业 CT 测量系统是一种采用强 X 射线对工业部件进行扫描获得各个方向的投影数据,然后重建工件断面或三维图像来精确测量发动机等工件内外部的几何尺寸、材料密度和内部缺陷的无损检测系统,与其他测量技术相比,具有非破坏性、不受被测物体内外结构复杂程度影响等突出特点,特别适合测量工件的封闭内腔。国家自然科学基金资助项目“基于高精度工业 CT 测量系统的发动机材料可靠性分析技术研究”和“大视场双螺旋锥束 CT 扫描与重建”,形成了大视场锥束 CT 扫描重建、三维工业 CT 图像边缘检测、发动机等工件的内部缺陷自动检测等关键技术。以下三篇文章的研究,属于该项目研究的一部分。

在目前的工业无损检测领域,由于受面阵探测器尺寸的限制,锥束 CT 的视场区域仍然有限,用传统的扫描方式无法实现大型发动机、火箭、铁路铸件等大型物体的检测。因此,近年来国内外展开了一系列关于小型面阵探测器检测大物体的扫描方式和成像方法的研究。其次,由于锥束螺旋 CT 具有扫描速度快,轴向分辨率高,射线利用率高等优点,关于锥束螺旋 CT 的重建算法也成了近年来 CT 领域的研究热点。《锥束螺旋 CT 半覆盖扫描重建》研究在每个投影角下射线束只需要覆盖待检测区域一半的锥束螺旋 CT 扫描及其重建方法,该方法既可以检测较大的物体,又可以扫描长物体,重建时间也较快。

边缘检测是图像分割、特征提取、缺陷识别、测量与分析等工作的基础,边缘检测的精确性直接影响到后续工作的正确性和精度,也是图像处理的难点。在实际工程领域,不但要求有好的边缘检测效果,而且要求处理的速度快。《基于小波定位及 Facet 模型的三维工业 CT 图像边缘检测》一文介绍了一种结合小波变换的 Facet 模型快速三维边缘检测的方法。利用该论文提出的边缘检测方法不但可以得到更好的三维边缘,而且速度比直接用 Facet 模型快。

工件缺陷的形式多种多样,裂纹是最常见的缺陷。在工业 CT 图像中,大部分的裂纹呈现出线性或分段线性的特点,另外,考虑到工业 CT 图像或多或少都带有一定的噪声,因此,对工业 CT 含噪图像中的线性裂纹进行有效探测是成功分析裂纹属性的第一步。常见的探测含噪图像中裂纹的方法,是采用先对图像进行降噪再提取裂纹的思路,而在降噪过程中,不可避免地会损失掉一部分有用信息。因此,《工业 CT 含噪图像中的裂纹探测》一文研究了另外一种思路,即在不降噪的情况下,直接在工业 CT 含噪图像数据中探测裂纹。

以上研究工作是在重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室 ICT 研究中心完成的。该中心是专门从事工业 CT 技术的理论研究、系统开发、推广应用和高层次人才培养的实体。中心先后承担并完成了国家“863”计划项目、国家自然科学基金项目、国家“八五”、“九五”攻关项目及省市攻关项目、大型企业项目等,研制出多个型号的工业 CT 系统,广泛应用于航天、航空、铁路、汽车、材料、石油、教育等领域。中心研制的工业 CT 系统,为我国的卫星和神舟系列载人飞船的成功发射做出了重要贡献。中心先后获多项省部级科技奖,2007 年,以重庆大学为第一完成单位的“高精度高能大型工业 CT 无损检测系统研制及应用”项目获国家科技进步二等奖。我们的研究工作,正是在这些成果的基础上进行的。

文章编号 1004-924X(2010)02-0434-09

## 锥束螺旋 CT 半覆盖扫描重建

邹晓兵<sup>1,2</sup>, 曾理<sup>1,3</sup>

- (1. 重庆大学 光电技术及系统教育部重点实验室 ICT 研究中心, 重庆 400044;
2. 重庆大学 光电工程学院, 重庆 400044;
3. 重庆大学 数理学院, 重庆 400044)

**摘要:**锥束螺旋 CT 能够解决长物体的检测问题,但其视场直径受限于面板探测器的宽度。为扩大锥束螺旋 CT 的视场直径,提出了一种螺旋 CT 视场区域半覆盖扫描的重建方法。扫描时,转台首先沿垂直于中心射线和转轴的方向平移一定距离,然后用普通螺旋 CT 的扫描方式来获得需要的投影数据。接着,利用推广的偏心锥束螺旋 FDK 算法进行重建,推广后的重建算法与标准的螺旋 FDK 算法具有同样的计算效率,而且不需要重排投影数据。实验结果表明,锥束螺旋 CT 半覆盖扫描能够将锥束螺旋 CT 的视场半径扩大 1.86 倍;重建图像的质量与使用大面板探测器全覆盖的标准 FDK

收稿日期:2009-06-30;修订日期:2009-07-23.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60672098;No. 60972104)

算法基本相当;由于投影数据量的减少,锥束螺旋 CT 半覆盖扫描的重建时间比使用大面板探测器的标准 FDK 算法减少了 376.66 s。因此,锥束螺旋 CT 的半覆盖扫描可以有效扩大视场直径,且具有较高的计算效率和较少的重建时间。

**关键词:** X 射线成像;锥束螺旋 CT;半覆盖扫描;偏心 FDK 算法

**中图分类号:** TG115.281;TP391 **文献标识码:** A

## Half-cover scanning and reconstructing for helical cone-beam CT

ZOU Xiao-bing<sup>1,2</sup>, ZENG Li<sup>1,3</sup>

(1. ICT Research Center, Key Laboratory of Optoelectronic Technology and

System of the Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. College of Photoelectric Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

3. College of Mathematics and Physics, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** Cone-beam helical Computed Tomography(CT) can scan a long object, but the conventional scanning mode of X-ray CT imaging is limited by the width of planar detector when a large object is inspected. As an alternative, a scanning and reconstructing algorithm is presented based on the Field of View(FOV) for half-cover scanning to extend the diameter of the FOV for the cone-beam helical CT. In scanning, the gantry is translated horizontally, whose direction is vertical to the central ray and rotary axis. Then the conventional helical scanning is used to obtain the projection data needed. During reconstruction, the extended FDK algorithm can provide the same efficiency as the conventional algorithm without resetting the projection data. Experimental results indicate that the half-cover scanning can extend the FOV up to 1.86 times that of the conventional method, and the image quality reconstructed by improved algorithm with a small planar detector is almost the same as that of the conventional algorithm with a large planar detector. The reconstruction time has reduced by 376.66 s due to the decrease of projections. These results show that the half-cover scanning of helical cone-beam CT can extend the diameter of the FOV, and can offer a higher calculation efficiency and low reconstruction time.

**Key words:** X-ray imaging; helical cone-beam CT; half-cover scanning; off-center FDK algorithm

## 1 引言

传统的 X 射线照相(CR 或 DR)可以检测产品的缺陷或身体的病变,比如检测炭素制品、焊缝、木材、乳腺<sup>[1-4]</sup>等,但是由于 X 射线照相本身的局限性,很难准确得到待检测物品的三维信息和缺陷的深度信息,而 CT 检测技术恰好可以解决这个问题。锥束螺旋 CT 的出现,使 CT 具有了更广的应用前景。与二维 CT 相比,锥束 CT 具有扫描速度快,轴向分辨率高,射线利用率高等优点。锥束螺旋 CT 不仅具有锥束 CT 的优点,而且可以解决长物体的检测问题,它的扫描轨迹

满足精确重建的条件<sup>[5]</sup>,已成为近年来 CT 领域的研究热点。就锥束螺旋 CT 的重建算法而言,解析的重建算法有近似重建算法<sup>[6-9]</sup>和精确重建算法<sup>[10-12]</sup>两种。Feldkamp 首先提出了高效实用的近似重建算法<sup>[13]</sup>(一般称之为 FDK 算法),后来,Ge Wang 和 Kudo 等人分别提出了基于螺旋扫描的 FDK 算法<sup>[6-7]</sup>。由于 FDK 算法的高效性,对噪声的鲁棒性,以及在锥角较小时可获得较好的重建效果,一直是 CT 领域的研究热点。一般情况下,锥束螺旋 CT 扫描及其成像<sup>[6-7]</sup>是基于物体在每个投影角下被射线束完全覆盖,但由于面板探测器尺寸的限制,锥束螺旋 CT 的视场直径很有限。在二维 CT 中,常用 2 代扫描检测大工

件<sup>[14]</sup>,傅健等人也提出了二维视场区域(Field of View, FOV)半覆盖扫描<sup>[15-17]</sup>和三维 FOV 半覆盖扫描和相应的重建方法<sup>[18-19]</sup>,龚磊和 Ming Chen 等人提出平移式的扫描和相应的重建方法<sup>[20-21]</sup>。这些扫描方式都是基于平面扫描轨迹(即射线源相对于被扫描物体的运动轨迹是在同一个平面内)。Noo 等人提出螺旋锥束半扫描<sup>[22]</sup>重建,这种半扫描仍然要求射线束在每个投影角下覆盖物体整个断面,它可以减少锥束螺旋的重建时间,但是不能解决小面板探测器检测大物体的问题。

本文提出一种基于锥束螺旋扫描和小宽度面板探测器的 FOV 螺旋半覆盖扫描(以下简称 FOV 螺旋半覆盖扫描)的重建方法,以解决大尺寸物体的扫描问题。扫描时,只需要物体沿垂直于旋转轴和中心射线(射线源与面板探测器中心的连线,下同)的方向平移一次,然后用一般的锥束螺旋扫描即可得到需要的投影数据。文中对标准锥束螺旋 FDK 算法进行了推广,得到一种 FOV 螺旋半覆盖扫描的偏心螺旋 FDK 算法,该算法不需要对投影数据重排和插值,从而避免了重排和插值带来的数值误差。

## 2 锥束螺旋 FOV 半覆盖扫描及其重建

### 2.1 锥束螺旋 FOV 半覆盖扫描

假设待检测物体为一有限长的圆柱形物体,且待检测物体垂直放置于转台上,物体的轴线与转台的轴线重合。如图 1 所示,以物体的中心为原点  $O$ ,过原点  $O$  并平行于射线束的中心平面(过中心射线并垂直于轴线的射线平面,下同)为  $x_1x_2$  平面,过原点  $O$  并垂直于  $x_1x_2$  面为  $x_3$  轴(即转台或物体的轴线为  $x_3$  轴)建立固定直角坐标系  $O-x_1x_2x_3$ 。如图 1 所示,再以平行于探测器的行为  $u$  轴,平行于探测器的列为  $v$  轴,沿  $S$  到探测器中心  $O'$  的方向为  $w$  轴建立旋转坐标系  $O'-uvw$ 。图 2 表示待检物体平移后采样前的俯视图,其中  $r$  是待检测的视场区域半径, $R$  为物体平移前射线源  $S$  到物体轴线的距离, $\gamma_m$  是射线束的最大水平半张角(即最大半扇角), $O'$  为面板探测器的中心。

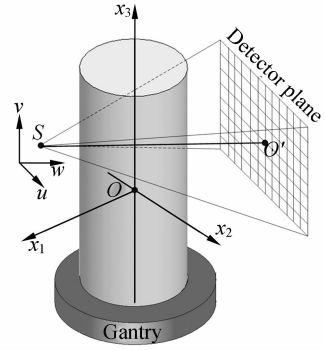


图 1 FOV 螺旋半覆盖扫描结构

Fig. 1 Configuration of half-cover scanning

FOV 螺旋半覆盖扫描的原理为:扫描前,转台带动待检测物体沿垂直于中心射线和转轴的方向平移到  $O$ ,使射线束至少覆盖物体横截面的一半(如图 2 所示),然后射线源与探测器绕转台的轴线旋转(或转台带动物体绕其轴线旋转),同时转台带动物体沿其轴线平移(或射线源和探测器沿转台的轴线平移),得到锥束螺旋 FOV 螺旋半覆盖扫描的投影。

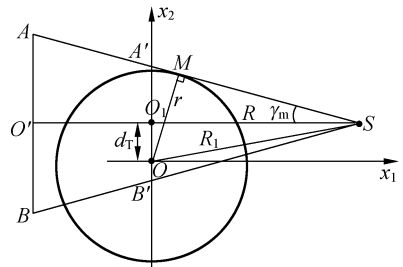


图 2 平移后扫描前的俯视图

Fig. 2 Top view after translation and before scanning

由图 2 可知,转台的平移距离为:

$$d_T = r / \cos \gamma_m - R \tan \gamma_m, \quad (1)$$

其中  $\gamma_m$  为射线束的最大水平半张角。

在每个投影角下,射线束至少覆盖物体横截面的一半,因此,由图 2 可知,转台的平移距离  $d_T \leq R \tan \gamma_m$ 。

### 2.2 偏心锥束螺旋 FDK 算法

我们称与实际探测器平行并通过转轴的平面为中心探测器,如图 2 所示的  $AB$  为实际探测器的一行, $A'B'$  为相应的中心探测器。标准的锥束螺旋 FDK 算法要求物体在每个投影角下被射线束完全覆盖,而且在每个投影角下,中心射线与源



$$U = \frac{R_1 - x \cos(s + s_0) - y \sin(s + s_0)}{R_1}, \quad (13)$$

$$s_b = 2\pi \frac{z - z_0}{h} - \pi, s_t = 2\pi \frac{(z - z_0)}{h} + \pi, \quad (14)$$

$$h_R(u_1) = \int_{-\infty}^{\infty} |\omega| e^{j2\pi\omega u_1} d\omega. \quad (15)$$

是斜坡滤波器,  $p(s, u_1, v_1)$  表示投影角为  $s$ , 虚拟中心探测器坐标为  $(u_1, v_1)$  的投影。

对 FOV 螺旋半覆盖扫描的投影数据, 如果直接用(12)式重建, 则需要将投影数据重排, 为避免重排, 我们将(12)式进行推广, 得到如下的非重排的重建方法。

由(15)式可知:

$$h(u_1' - u_1) = \int_{-\infty}^{\infty} |\omega| \exp(j2\pi\omega(u_1' - u_1)) d\omega. \quad (16)$$

将(9)式代入上式, 有:

$$h(u_1' - u_1) = \int_{-\infty}^{\infty} |\omega| \exp\left(\frac{j2\pi\omega R_1(u_1' - u)}{R}\right) d\omega, \quad (17)$$

令  $\omega' = \frac{R_1}{R}\omega$ , 代入(17)式, 有:

$$h(u_1' - u_1) = \frac{R^2}{R_1^2} \int_{-\infty}^{\infty} |\omega'| \exp(j2\pi\omega'(u_1' - u)) d\omega' = \frac{R^2}{R_1^2} h(u_1' - u). \quad (18)$$

又由(9)式可知:

$$du_1 = \frac{R_1}{R} du. \quad (19)$$

将(18)、(19)式代入(12)式, 得到推广后的偏心螺旋 FDK 算法:

$$f(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} \frac{R}{R_1} \int_{s_b}^{s_t} ds \frac{1}{U^2} \int_{-\infty}^{\infty} du \left[ \frac{R_1}{\sqrt{R_1^2 + u_1^2 + v_1^2}} \times p(s, u, v) h(u_1' - u) \right]. \quad (20)$$

### 2.3 偏心 FDK 算法的步骤

通过比较(12)和(20)式, 可以看出, 对 FOV 螺旋半覆盖扫描, 如果用(20)式重建, 只需要根据公式(4)求出待重建点  $\mathbf{x}$  在各个投影角下的投影坐标  $(u, v)$ , 然后用类似于传统锥束螺旋 FDK 算法的步骤, 就可得到推广的偏心 FDK 算法的步骤, 而且不需要投影数据的重排, 从而避免了重排

带来的数值误差。偏心 FDK 算法仍然分为三步:

第一步, 投影数据的预处理

对投影数据进行预处理时, 首先根据投影值所对应的投影坐标  $(u, v)$ , 并结合公式(9)和公式(11)计算  $(u_1, v_1)$ , 然后对投影  $p(s, u, v)$  预处理

$$p_1(s, u, v) = \frac{R_1}{\sqrt{R_1^2 + u_1^2 + v_1^2}} p(s, u, v). \quad (21)$$

第二步, 投影数据的滤波

投影数据预处理后, 再对每个投影角的投影数据用斜坡滤波器逐行滤波

$$\tilde{p}(s, u, v) = p_1(s, u, v) * h_R(u), \quad (22)$$

其中  $*$  表示卷积。

第三步, 对滤波后的投影加权反投影

对每个待重建点  $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3)$ , 根据公式(14)求出反投影的投影角范围  $[s_b, s_t]$ , 然后加权反投影

$$f(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} \frac{R}{R_1} \int_{s_b}^{s_t} \frac{1}{U^2} \tilde{p}(s, u, v) ds, \quad (23)$$

其中加权系数  $U$  可以根据公式(13)求出。

在每个投影角下, 射线束至少覆盖物体横截面的一半。因此, 在每个投影角下, 我们只需要对物体横截面的一半进行反投影(如图 4 所示的阴影区域), 待所有投影数据反投影完时, 即得到待重建的图像。

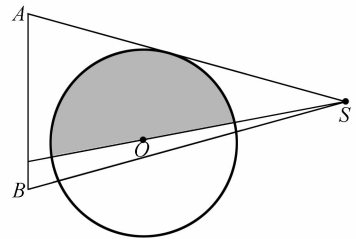


图 4 每个投影角的重建区域

Fig. 4 Reconstruction area at each view angle

## 3 实验结果

### 3.1 仿真实验

为验证本文给出的扫描方法和重建算法的有效性, 同时为对比使用大面板探测器全覆盖横截面锥束螺旋扫描(以下简称 FOVHFCS)和 FOV 螺旋半覆盖扫描(以下简称为 FOVHHCS)的重

建效果,我们利用解析法生成 Shepp-Logan 模型的投影数据,然后用点驱动法反投影。实验环境为 Intel(R) Xeon(TM) 3.2 GHz CPU, 4.00 GHz 主内存。表 1 给出了投影和重建参数。

表 1 模拟实验参数

Tab. 1 Parameters of simulation

参数	数值	
	FOVHFCs	FOVHHCS
源到旋转中心距离/mm	955.00	955.00
源到探测器距离/mm	1 178.00	1 178.00
每圈的投影数	360	360
物体半径/mm	100.00	100.00
探测器高/mm	200.00	200.00
探测器宽/mm	250.00	132.81
探测器行数	256	256
探测器列数	320	170
重建图像尺寸	256×256×256	256×256×256

重建结果如图 5、图 6 所示,其中图 5 为 FOV 螺旋全覆盖扫描以及 FOV 螺旋半覆盖扫描重建三维数据水平方向的第 160 张切片,图 6 为图 5 的中垂线的灰度曲线,其中图 6 的粗实线表示理论值,细实线和点线分别对应 FOV 全覆盖扫描和半覆盖扫描的重建结果。从图 5 可以看出,本文方法的结果基本类似于 FOV 螺旋全覆盖扫描重建的结果。同时,由图 6 的灰度曲线可以看出,由于投影数据的横向截断和斜坡滤波器的全局特性,使得 FOV 螺旋半覆盖扫描的重建效果比 FOV 螺旋全覆盖扫描的效果稍差,但是本文的方法使用小面板探测器扫描同样大小视场半径的图像(即本文的方法扩大了小面板探测器的视场半径),而且扫描时间与一次锥束螺旋的扫描时间相当。

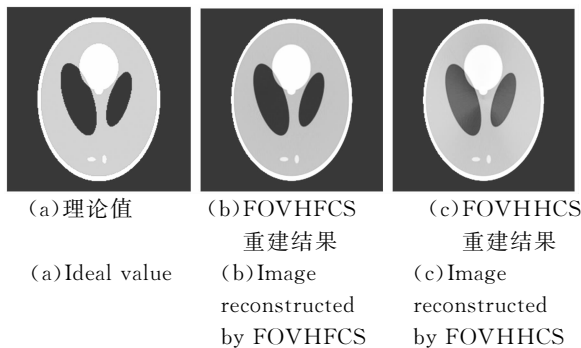


图 5 Shepp-Logan 模型重建结果

Fig. 5 Reconstruction results of Shepp-Logan phantom

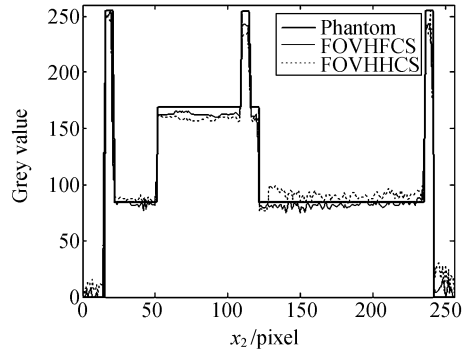


图 6 图 5 中垂线的灰度曲线

Fig. 6 Image profiles along the central vertical line of Fig. 5

重建同样大小的视场区域,为比较 FOV 螺旋全覆盖扫描和 FOV 螺旋半覆盖扫描的重建时间,我们统计了 Shepp-Logan 模型重建时滤波、反投影和总的的时间,结果如表 2 所示。由于本文方法使用小面板探测器,投影数据比用大面板探测器少,所以 FOV 螺旋半覆盖扫描的滤波和反投影时间都比 FOV 螺旋全覆盖的时间少,FOV 螺旋半覆盖扫描的重建时间大约是 FOV 全覆盖扫描重建时间的一半。

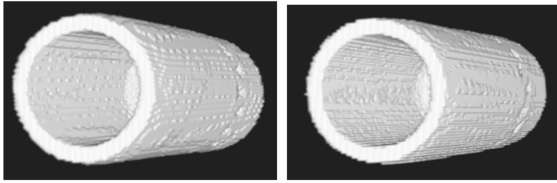
表 2 Shepp-Logan 模型重建时间(单位:s)

Tab. 2 Reconstruction time of Shepp-Logan phantom (Unit: s)

	FOVHFCs	FOVHHCS
滤波时间	191.20	54.00
反投影时间	562.64	323.73
总的重建时间	756.47	379.81

### 3.2 实际数据实验

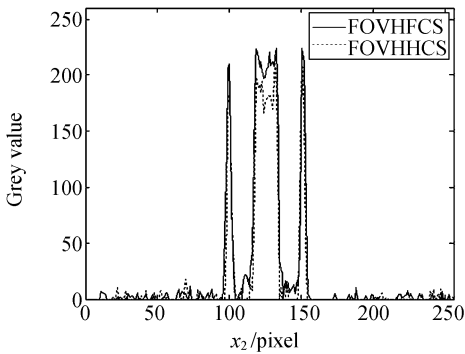
为验证本文方法对实际数据的有效性,我们对一个圆筒形的物体进行扫描和重建,重建矩阵为 256×256×256,结果如图 7、图 8 所示,其中图 7 是重建的三维效果图,图 8 重建图像在相同位置的灰度曲线。从图 7 和图 8 可以看出,与前面的仿真结果类似,FOV 螺旋全覆盖扫描和 FOV 螺旋半覆盖扫描的重建图像质量差不多,但是从图 8 的灰度曲线可以看出,由于投影数据的横向截断和斜坡滤波器的非局部性,使 FOV 螺旋半覆盖扫描重建的图像质量稍差于 FOV 螺旋全覆盖扫描的图像。



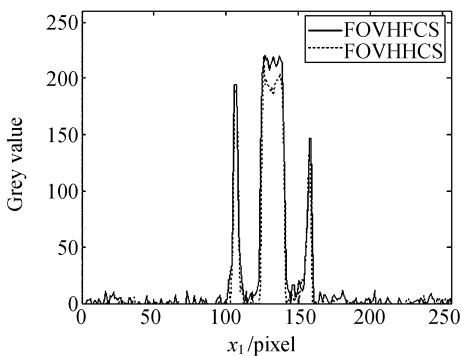
(a) FOVHFCS 重建结果 (b) FOVHHCS 重建结果  
(a) Image reconstructed by FOVHFCS (b) Image reconstructed by FOVHHCS

图 7 重建三维效果图

Fig. 7 Three dimensional image of reconstruction



(a)  $x_1 = 3.53 \text{ mm}$ ,  $x_3 = -43.53 \text{ mm}$



(b)  $x_2 = 0 \text{ mm}$ ,  $x_3 = -41.96 \text{ mm}$

图 8 重建灰度曲线

Fig. 8 Profiles along the line

### 3.3 锥束螺旋 CT 半覆盖扫描的视场直径

如果 FOV 螺旋全覆盖扫描和 FOV 螺旋半覆盖扫描都用  $132.81 \text{ mm} \times 200.00 \text{ mm}$  的面板探测器,源到转台的距离为  $955 \text{ mm}$ ,源到探测器的距离为  $1178 \text{ mm}$ ,则 FOV 螺旋全覆盖扫描的视场半径  $r_F = 53.75 \text{ mm}$ ,而 FOV 螺旋半覆盖扫描的视场半径  $r_H = 100.00 \text{ mm}$ 。由此可见,本文的方法可以把锥束螺旋 CT 的视场半径扩大至 1.86 倍。

## 4 结 论

从传统的锥束螺旋 CT 出发,为扩大锥束螺旋 CT 的视场直径,本文提出了 FOV 螺旋半覆盖扫描的偏心螺旋 FDK 算法。由于本文的方法只需要转台在螺旋扫描前沿垂直于中心射线和旋转轴的方向平移一次,因而易于机械实现;重建时,不需要对投影数据重排和插值,所以算法效率较高。实验结果证实,只需要一次螺旋扫描,就可以将视场半径扩大 1.86 倍,而且重建时间比 FOV 螺旋全覆盖扫描减少了  $376.66 \text{ s}$ ,大约是 FOV 螺旋全覆盖扫描重建时间的一半。由于投影数据的横向截断,使 FOV 螺旋半覆盖扫描的重建图像质量稍次于 FOV 螺旋全覆盖扫描的质量。在以后的工作中,我们将进一步研究一种可以替代斜坡滤波器的局部滤波器,从而解决投影数据横向截断的问题。

## 参考文献:

- [1] 周贤,刘义伦. 炭素制品缺陷的 X 射线自动检测技术研究[J]. 光学精密工程, 2006,14(3):503-508. ZHOU X, LIU Y L. X-ray automatic inspection techniques for carbon product defects [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(3): 503-508. (in Chinese)
- [2] 刘欣悦,黄廉卿. 利用多分辨率直方图特征分类数字 X 光乳腺图像[J]. 光学精密工程, 2006,14(2):

327-332.

LIU X Y, HUANG L Q. Classification of digital mammograms using multi-resolution histogram features [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(3):503-508. (in Chinese)

- [3] 任治,苏真伟,俞东宝,等. 一种焊缝 X 射线数字图像的缺陷提取算法[J]. 无损检测, 2009,31(2): 89-91, 146.

REN ZH, SU ZH W, YU D B, et al.. A method

- for extraction of defects in X-ray images [J]. *Non-destructive Testing*, 2009, 31(2): 89-91, 146. (in Chinese)
- [4] 王欣, 申世杰. 木材无损检测研究概况与发展趋势 [J]. 北京林业大学学报, 2009, 31(增1): 202-205. WANG X, SHEN SH J. Advances in non-destructive testing for lumber [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2009, 31( Supp. 1): 202-205. (in Chinese)
- [5] SMITH B D. Image reconstruction from cone-beam projections; necessary and sufficient conditions and reconstruction methods [J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 1985, MI-4(1): 14-25.
- [6] WANG G, LIN T H, CHENG P G, *et al.*. A general cone-beam reconstruction algorithm [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1993, 12(3): 486-496.
- [7] KUDO H, SATIO T. Helical-scan computed tomography using cone-beam projections [C]. *Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference*, 1991: 1958-1962.
- [8] TANG X Y, HEIEH J, NILSEN R A, *et al.*. A three-dimensional-weighted cone beam filtered back-projection (CB-FBP) algorithm for image reconstruction in volumetric CT—helical scanning [J]. *Physics in Medicine and Biology*, 2006, 51: 855-874.
- [9] KUDO H, RODET T, NOO F, *et al.*. Exact and approximate algorithms for helical cone-beam CT [J]. *Physics in Medicine and Biology*, 2004, 49: 2913-2931.
- [10] GRANGEAT P. Mathematical framework of cone-beam 3D reconstruction via the first derivative of the Radon transform [C]. *Lecture Notes in Mathematics*, Springer Verlag, 1992, 1497: 66-97.
- [11] KATSEVICH A. Improved exact FBP algorithm for spiral CT [J]. *Advance in Applied Mathematics*, 2004, 32: 681-697.
- [12] ZOU Y, PAN X C. Exact image reconstruction on PI-lines from minimum data in helical cone-beam CT [J]. *Physics in Medicine and Biology*, 2004, 49: 941-959.
- [13] FELDKAMP L A, DAVIS L C, KRESS J W. Practical cone-beam algorithm [J]. *Journal of Optical Society of America*, 1984, 1(A): 612-619.
- [14] 李开龙, 魏彪, 米德伶, 等. 基于FPGA的工业X-CT 2代扫描运动控制卡设计[J]. 光学精密工程, 2005, 13(增): 168-172.
- LI K L, WEI B, MI D L, *et al.*. Design of the 2nd generation scanning motion control card based on FPGA for industrial X-CT [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(Supp.): 168-172. (in Chinese)
- [15] 傅健, 路宏年. 扇束X射线ICT偏置扫描方式及其重构算法[J]. 光学技术, 2003, 29(1): 115-118. FU J, LU H N. Bias scan mode for fan-beam X-ray ICT and its reconstruction algorithm [J]. *Optical Technique*, 2003, 29(1): 115-118. (in Chinese)
- [16] 傅健, 路宏年. 工业CT半扫描成像技术[J]. 北京航空航天大学学报, 2005, 31(9): 966-969. FU J, LU H N. Half-scan mode for industrial CT [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2005, 31(9): 966-969. (in Chinese)
- [17] GREGOR J, GLEASON S S, PAULUS M J. Cone beam X-ray computed tomography with an offset detector array [C]. *IEEE International Conference on Image Processing*, 2003, 2: 803-806.
- [18] 李亮, 陈志强, 张丽, 等. 一种利用小体积偏置探测器的新型锥束X射线CT系统[J]. 高能物理与核物理, 2006, 30(8): 812-817. LI L, CHEN ZH Q, ZHANG L, *et al.*. A new cone-beam X-ray CT system with a reduced size planar detector [J]. *High Energy Physics and Nuclear Physics*, 2006, 30(8): 812-817. (in Chinese)
- [19] 傅健, 路宏年, 龚磊. 锥束射线三维大视场工业CT成像方法研究[J]. 光学技术, 2006, 32(2): 209-212. FU J, LU H N, GONG L. Research on cone-beam ray three dimensional large field of view industrial CT imaging method [J]. *Optical Technique*, 2006, 32(2): 209-212. (in Chinese)
- [20] 龚磊, 傅健, 路宏年, 等. 锥束射线RT扫描大视场三维CT成像方法研究[J]. 光学技术, 2006, 32(4): 567-570. GONG L, FU J, LU H N, *et al.*. Three dimension imaging method based on cone beam RT scanning mode [J]. *Optical Technique*, 2006, 32(4): 567-570. (in Chinese)
- [21] CHEN M, ZHANG H T, ZHANG P. BPF-based reconstruction algorithm for multiple rotation - translation scan mode [J]. *Progress in Natural*

*Science*, 2008, 18:209-216.

- [22] NOO F, KUDO H, DEFRISE M. Approximate short-scan filtered backprojection for helical CB

reconstruction [J]. *IEEE Nuclear Science Symposium*, 1998, 3:2073-2077.

#### 作者简介:



邹晓兵(1974—),男,四川大竹人,博士研究生,1997年于重庆师范大学获得学士学位,2007年于重庆大学获得硕士学位,主要从事CT重建和图像处理的研究。E-mail: xiaobingzou@163.com



曾理(1959—),男,四川郫县人,博士,教授,博士生导师,1986年于四川师范大学获理学学士学位,1989年于大连理工大学获理学硕士学位,1997年于重庆大学获工学博士学位,2000年至2001年在瑞士巴塞尔大学作博士后研究,主要从事工业CT和数字图像处理的研究。E-mail: drlizeng@hotmail.com

#### ● 下期预告

## 控制大平面砂轮磨削面锥形 误差提高齿轮螺旋线精度

凌四营<sup>1</sup>,王立鼎<sup>1,2</sup>,马勇<sup>1</sup>,王晓东<sup>1,2</sup>,娄志峰<sup>1</sup>

(1. 大连理工大学 精密特种加工及微系统教育部重点实验室 高精度齿轮研究组,辽宁 大连 116023;

2. 大连理工大学 微纳米技术及系统辽宁省重点实验室,辽宁 大连 116023)

出于研制高精度标准齿轮的需要,以 Y7125 磨齿机为例分析了大平面砂轮磨削面锥形误差对齿轮螺旋线偏差的影响。建立了磨削的几何模型,并推导出了影响量的数学表达式。理论分析结果显示,砂轮与齿面有效接触宽度对齿轮螺旋线形状偏差的影响不大,而随着被磨齿轮齿宽的加大,对齿轮螺旋线形状偏差的影响系数会显著增大;砂轮磨削面锥形误差使被磨齿轮螺旋线偏差曲线呈弧形,且弧度从齿根到齿顶逐渐增大。最后通过一实例进行了误差测量、磨齿实验与偏差分析。研究结果表明,控制大平面砂轮磨削面的锥形误差在  $2.7'$  以内可满足加工 1 级螺旋线精度齿轮的加工要求。