

文章编号 1004-924X(2010)09-2077-09

# 重排的半覆盖螺旋锥束 CT 的反投影滤波重建

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. 重庆教育学院 计算机科学系, 重庆 400067; 3. 重庆大学 数理学院, 重庆 400044)

**摘要:** 由于传统的螺旋锥束 CT 系统采用的扫描方法使视场范围受到限制, 本文深入分析了螺旋锥束 CT 的半覆盖扫描方式, 提出了螺旋锥束半覆盖扫描的重建算法。该扫描方式只要求射线束覆盖物体横截面的一半以上, 探测器的宽度和投影数据量大约是传统螺旋锥束 CT 的一半, 从而节约了探测器的成本。结合扇形束投影的特点和二维反投影滤波(BPF)来实现这种横向截断投影的重建, 研究了重排的加权 BPF 重建方法。该方法首先根据重建的层将半覆盖的螺旋锥束 CT 投影数据重排为半覆盖的扇形束 CT 投影, 然后用加权的扇形束 BPF 算法进行重建。同传统视场区域横截面全覆盖的 FDK 算法相比, 该方法即使在大螺距的情况下其重建结果也更接近于真实值, 而且均方误差减少了一半, 重建时间节约了 3/5。

**关键词:** 螺旋锥束 CT; 半覆盖扫描; 重排; 反投影滤波(BPF)算法

**中图分类号:** TP391; R814.42 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20101809.2077

## Rebinned BPF reconstruction for helical cone-beam CT with half-cover scanning

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

(1. *ICT Research Center, Key Laboratory of Optoelectronic Technology and System, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China;*  
2. *Department of Computer Science, Chongqing Education College, Chongqing 400067, China;*  
3. *College of Mathematics and Physics, Chongqing University, Chongqing 400044, China*)

**Abstract:** As the conventional scan mode in helical cone-beam CT limits the field of view of the CT system, this paper analyzes the half-cover scanning of helical cone-beam CT and presents a new reconstruction method combined the Backprojected Filter(BPF) reconstruction and the cone-beam CT with half-cover scanning. This scanning method only demands more than half of cross section to be covered by X-ray beam at each view angle, and the width of the planar detector is about half of the conventional helical cone-beam CT, so that the cost of planar detector is saved. By combing the fan projection and 2D BPF, this paper researches a rebinned-weighted BPF algorithm for half-cover helical cone-beam CT, in which the projection data are firstly rebinned to half-cover fan-beam data, and then the weighted BPF are used in reconstruction. The results validate that reconstruction time with rebinned-weighted

收稿日期: 2010-01-11; 修订日期: 2010-03-02.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 60972104); 重庆大学研究生科技创新基金资助项目(No. 200911A1B0040320)

ted BPF algorithm has reduced to 3/5 that of the conventional helical FDK algorithm. Furthermore, the reconstructed value is more closed to the real value than that of FDK algorithm with large helical pitches, and the MSE has reduced by half.

**Key words:** helical cone-beam CT; half-cover scanning; rebinning; Backprojected Filter(BPF) algorithm

## 1 引言

计算机层析成像(Computed Tomography, CT)作为一种先进的无损检测技术,已逐渐应用于工业、农业、医疗、安全检查和航空航天等领域<sup>[1-3]</sup>。与一般的二维 CT 相比,圆形扫描轨迹的锥束 CT<sup>[4]</sup>一次扫描可以获得更多的重建层,所以锥束 CT 比二维 CT 具有更高的射线利用率和检测效率。但是由于圆形扫描轨迹的局限,使得其可检测物体的长度有限。螺旋锥束 CT<sup>[5]</sup>一次扫描不但可以获得更多的重建层,而且可以检测长物体。在工业和医学 CT 中,除了考虑长物体的检测外,视场直径也是一个重要指标。传统的二维和三维 CT 扫描方式,一般要求射线束在每个投影角度下覆盖物体的整个横截面,但是当待检测的区域大于传统 CT 扫描的最大视场区域时,传统的检测方式受到限制。基于探测器偏置的扫描<sup>[4,6-14]</sup>利用同样的探测器尺寸可以获得更大的视场区域,因而探测器偏置的扫描方式既减少了探测器的尺寸,节约了探测器的成本,而且可以获得更大的视场区域。尤其是在医学领域,病人受照剂量的减少一直是 CT 领域的难点。这种探测器偏置的扫描方法由于在每个投影角下射线束只覆盖部分视场区域,使得病人的受照剂量也大为减少,因此令人关注。目前常见的探测器偏置扫描有二维 CT 的偏置扫描<sup>[6-10]</sup>和圆形扫描轨迹的三维锥束 CT 的偏置扫描<sup>[4,11-15]</sup>。本文深入研究了三维螺旋锥束 CT 的半覆盖扫描,并提出了螺旋锥束半覆盖扫描的重建算法。

由于探测器的偏置,使得投影数据在横向上是截断的。对于二维 CT 而言,常见的处理方法是利用投影的对称性,将投影数据重排为平行束<sup>[6-7]</sup>,然后再重建;也有直接用反投影滤波(Backprojected Filter, BPF)算法<sup>[8-9]</sup>或加权的滤波反投影算法进行重建<sup>[10]</sup>的;对圆形扫描轨迹的锥束 CT 而言,已有的方法是对投影进行重排后

用半扫描的 FDK 算法<sup>[11]</sup>,平行束算法<sup>[13,15]</sup>,或者加权的圆形扫描轨迹的锥束 Katsevich 算法重建<sup>[4,14]</sup>,也有人提出直接用 BPF 算法重建<sup>[12]</sup>。上述重建方法是基于二维 CT 或者圆形扫描轨迹的锥束 CT 的偏置扫描提出的。对于螺旋锥束 CT 半覆盖扫描,由于其扫描轨迹的特殊性,常用的探测器偏置扫描的重建算法受到限制。

螺旋锥束 CT 的 BPF 算法<sup>[5,16]</sup>是一种先反投影再沿 PI 线<sup>[17]</sup>滤波的方法,它可以解决横向截断投影重建的问题,但是它要求感兴趣区域(Region-of-Interest, ROI)内的 PI 线不能截断<sup>[5]</sup>。螺旋锥束 CT 半覆盖扫描在每个投影角下只覆盖物体的部分横截面,所以它的投影数据不但是横向截断的,而且 ROI 区域内的投影也是截断的。因此,螺旋锥束 CT 半覆盖扫描的每条 PI 线是截断的,不能直接用螺旋锥束 CT 的 BPF 算法重建。对于这种螺旋锥束 CT 半覆盖扫描,其它的探测器偏置扫描重建算法也受到限制。针对上述问题,本文提出一种重排的螺旋锥束 CT 半覆盖的 BPF 重建算法。首先利用 Noo 和陈炼等人提出的重排方法<sup>[18-19]</sup>将螺旋锥束 CT 半覆盖扫描的投影数据重排为扇形束 CT 半覆盖的投影数据,然后根据扇形束投影的特点,在反投影时补全 PI 线上的截断数据,最后沿 PI 线滤波,从而实现螺旋锥束 CT 半覆盖的重建。

## 2 螺旋锥束 CT 半覆盖扫描

螺旋锥束 CT 半覆盖扫描几何如图 1 所示,图 2 为半覆盖扫描的俯视图。假设待检测物体为一圆柱形物体。扫描前,探测器沿探测器行的方向上平移,使射线束覆盖物体横截面的一半以上(为保证稳定性,使投影数据部分重叠);然后物体绕其轴线旋转并沿其轴向平移(或探测器绕物体的轴线旋转并沿物体的轴向平移)。

设射线源到物体轴线的距离为  $R$ ,射线源到探测器的距离为  $D$ ,投影角为  $\lambda$ 。以物体待检测

的中心为坐标原点, 建立固定坐标系, 以射线源为原点建立旋转坐标系  $(\omega, u, v)$ ,  $e_w(\lambda), e_u(\lambda), e_v(\lambda)$  分别为  $\omega, u, v$  轴的单位向量, 其中  $e_w(\lambda)$  沿探测器的中心指向射线源,  $e_u(\lambda)$  沿探测器的行方向,  $e_v(\lambda)$  沿探测器的列方向, 并且有

$$\begin{cases} e_w(\lambda) = (-\cos \lambda, -\sin \lambda, 0)^T \\ e_u(\lambda) = (-\sin \lambda, \cos \lambda, 0)^T \\ e_v(\lambda) = (0, 0, 1)^T \end{cases} \quad (1)$$

设射线源在探测器平面的投影为  $O'$ , 以  $O'$  为原点, 沿  $e_u(\lambda), e_v(\lambda)$  方向建立探测器的二维投影坐标  $(u, v)$ , 则物体任一点  $r = (x, y, z)$  在探测器上的投影坐标为:

$$\begin{cases} u = D \frac{r \cdot e_u(\lambda)}{R - r \cdot e_w(\lambda)} \\ v = D \frac{z - h\lambda / (2\pi)}{R - r \cdot e_w(\lambda)} \end{cases}, \quad (2)$$

其中:  $u \in [-u_\epsilon, u_m]$ ,  $u_m$  为探测器的最大半宽度,  $2u_\epsilon$  为投影重叠区域的宽度。

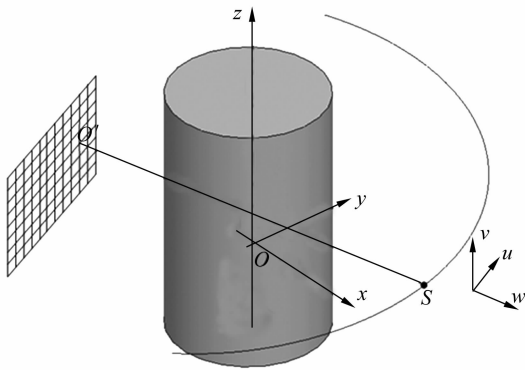


图 1 半覆盖的螺旋锥束 CT 几何

Fig. 1 Geometry of half-cover helical cone beam CT

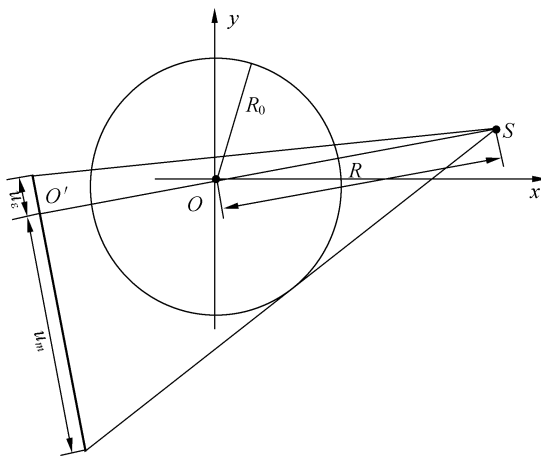


图 2 半覆盖的螺旋锥束扫描的俯视图

Fig. 2 Top view of half-covered cone beam scanning

### 3 重排的 BPF 算法

一条 PI 线段是连接螺旋轨道上  $2\pi$  范围内任意两点的线段<sup>[5,17]</sup>, 如图 3 所示,  $\lambda_s, \lambda_t$  是螺旋轨道上的两个投影角, 且  $|\lambda_t - \lambda_s| < 2\pi$ , 则连接  $r_0(\lambda_s), r_0(\lambda_t)$  两点的线段就是一条 PI 线段<sup>[5]</sup>。设 PI 线段与 ROI 支撑的两个交点分别为  $x_{\pi a}, x_{\pi b}$ ,  $\lambda_1, \lambda_2$  为 PI 区间  $[\lambda_s, \lambda_t]$  内的两个投影角, 根据前面描述的螺旋锥束半覆盖的扫描可知, 在每个投影角下, 射线束只覆盖物体的部分横截面, 因此, 在  $[\lambda_s, \lambda_t]$  内的每个投影角, PI 线上的投影是截断的 (如图 3 所示)。也就是说, 传统的螺旋锥束 BPF 算法不能直接应用于这种 ROI 内 PI 线投影截断的重建。

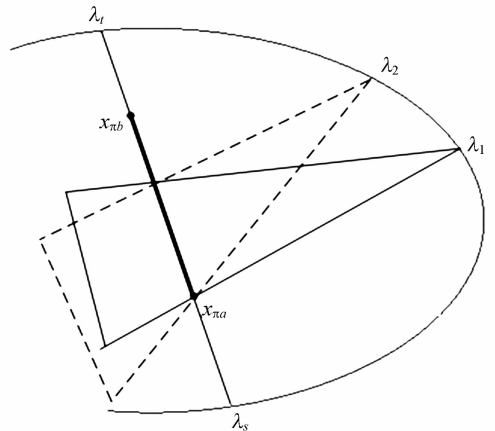


图 3 PI 线及 PI 线截断

Fig. 3 PI line and its truncation

对于螺旋锥束 CT 而言, 物体任一点有一条而且只有一条 PI 线<sup>[17]</sup>; 但是对于扇形束 CT 而言, 物体任一点有无穷多条 PI 线<sup>[20]</sup>。扇形束的 PI 线段有多种选取方法, 一般选取一组两两不相交, 而且覆盖视场区域的线段作为其 PI 线。本文选取一组平行于  $x$  轴方向并覆盖视场区域的线段作为 PI 线。

下面分析扇形束 CT 半覆盖扫描 PI 线上的数据是非截断的。如图 4 所示,  $\lambda_1, \lambda_2$  是 PI 线所对应投影角区间的两个端点, PI 线与 ROI 支撑的两个交点是  $x_{\pi a}, x_{\pi b}$ ,  $\lambda \in [\lambda_1, \lambda_2]$ 。由图 4 可知, 当投影角为  $\lambda$  时, 半覆盖扇形束 CT 不能覆盖整个

ROI, 它将 PI 线分成了  $[x_{\pi a}, x_{\pi c}]$  和  $[x_{\pi c}, x_{\pi b}]$  两段, 其中  $[x_{\pi a}, x_{\pi c}]$  能被投影角  $\lambda$  的射线束覆盖, 而  $[x_{\pi c}, x_{\pi b}]$  虽然不能被投影角为  $\lambda$  的射线束覆盖, 但是它能够被  $\lambda + \pi$  的射线束覆盖。所以对于每条 PI 线, 它可以被  $\lambda \in [\lambda_1, \lambda_2]$  和  $\lambda + \pi \in [\lambda_2, \lambda_1 + 2\pi]$  的射线束覆盖, 利用扇形束的这种特殊性, 可以使得半覆盖扇形束 CT 的 PI 线非截断。也就是说, 如果能将半覆盖螺旋锥束 CT 的投影转化为半覆盖扇形束 CT 的投影, 即可以利用这种非截断性, 结合相应的重建方法, 实现半覆盖螺旋锥束 CT 的重建。

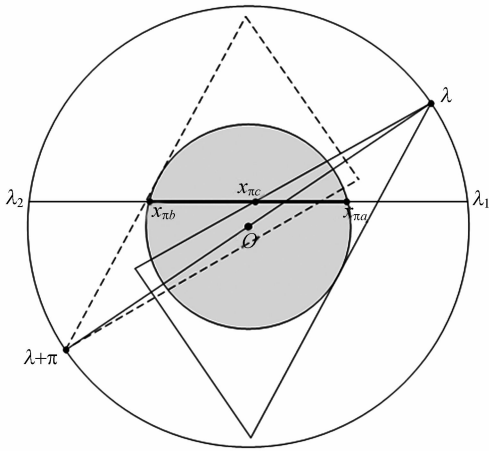


图 4 扇形束 CT 半覆盖 PI 线的非截断

Fig. 4 Non-truncation of PI-line for half-cover fan-beam CT

F. Noo<sup>[18]</sup> 和陈炼<sup>[19]</sup> 等人提出了一种将螺旋投影重排为扇形束投影的方法, 本文利用此方法将半覆盖的螺旋锥束 CT 的投影重排为半覆盖的二维扇形束 CT 的投影。对每一个重排的层位置  $z$ , 假设有一虚拟的扇形束射线源与  $z$  共面, 并且射线源与旋转轴 ( $z$  轴) 的距离为  $R$ , 扇形束的直线探测器与面板探测器的行方向相同, 且与虚拟射线源的距离为  $D$ , 则虚拟射线源的投影角:

$$\phi = \lambda \bmod 2\pi, \quad (3)$$

虚拟射线源的扫描轨迹为:

$$\mathbf{r}_0(\phi) = (R \cos \phi, R \sin \phi), \quad (4)$$

螺旋投影重排为扇形束投影的重排公式<sup>[19]</sup>:

$$p_z(\phi, u) \simeq \frac{\sqrt{D^2 + u^2}}{\sqrt{D^2 + u^2 + v^2}} p(\lambda, u, v), \quad (5)$$

其中  $p(\lambda, u, v)$  表示锥束投影,

$$v = \frac{D}{R} \left( z - \frac{h\lambda}{2\pi} \right), \quad (6)$$

式中:  $h$  是螺旋锥束的螺距 (即物体旋转一周时, 物体沿轴向的移动距离)。

李亮等人提出了圆形扫描轨迹的锥束 CT 的 BPF 算法<sup>[21]</sup>, 该方法在锥束的中心层 (中心层相当于二维 CT 的扫描和重建) 是精确的。根据该重建算法, 本文提出如下的半覆盖的螺旋锥束 CT 的 BPF 算法

$$f(\mathbf{r}_z) = \frac{1}{2\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} dx' \frac{1}{x-x'} \times \int_0^{2\pi} d\phi \frac{W_1(u)W_2(\phi)}{\|\mathbf{r}-\mathbf{r}_0(\phi)\|} \frac{\partial}{\partial \phi} p_z(\phi, u), \quad (7)$$

其中  $\mathbf{r}_z$  表示与重建层  $z$  相关的一个点,  $w_1(u)$  是投影重叠区域的冗余加权函数

$$w_1(u) = \begin{cases} 1 & u < 0 \\ 0 & 0 \leq u \leq u_\epsilon \end{cases}, \quad (8)$$

满足

$$w_1(u) + w_1(-u) = 1, \quad (9)$$

式中  $w_2(\phi)$  是扇形束对称反投影加权函数<sup>[21]</sup>

$$w_2(\phi) = \begin{cases} 1 & \phi \in [\lambda_1, \lambda_2) \\ -1 & \phi \in [0, \lambda_1) \cup (\lambda_2, 2\pi] \end{cases}, y \geq 0, \quad (10)$$

$$w_2(\phi) = \begin{cases} -1 & \phi \in [\lambda_1, \lambda_2) \\ 1 & \phi \in [0, \lambda_1) \cup (\lambda_2, 2\pi] \end{cases}, y < 0, \quad (11)$$

投影  $p_z(\phi, u)$  由式(3)和式(5)给出。

结合螺旋锥束投影的重排和上述的 BPF 算法, 螺旋锥束半覆盖 BPF 算法分为四步:

第一步: 重排

首先根据重建的  $z$  位置, 利用公式(3)和(4), 将螺旋锥束半覆盖的投影重排为扇形束半覆盖的投影  $p_z(\phi, u)$ 。

第二步: 对投影数据求导

根据链式法对重排后的投影数据求导

$$\frac{\partial}{\partial \phi} p_z(\phi, u) = \left( \frac{\partial}{\partial \phi} + \frac{u^2 + D^2}{D} \frac{\partial}{\partial u} \right) p_z(\phi, u), \quad (12)$$

第三步: 将求导后的数据反投影到 PI 线上

$$g_x(\mathbf{r}_z) = \int_0^{2\pi} d\phi \frac{w_1(u)w_2(\phi)}{\|\mathbf{r}-\mathbf{r}_0(\phi)\|} \frac{\partial}{\partial \phi} p_z(\phi, u), \quad (13)$$

第四步:沿 PI 线进行逆 Hilbert 变换滤波

$$f(r_z) = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{(x_2 - x)(x - x_1)}} \times \left[ \int_{x_1}^{x_2} dx' \frac{\sqrt{(x_2 - x')(x' - x_1)}}{\pi(x - x')} g_{\pi}(x', y, z) + C \right], \quad (14)$$

其中  $x_1 < x_{\pi a} < x_{\pi b} < x_2$ ,  $C$  表示物体沿 PI 线的积分。

上述算法对于二维半覆盖 BPF 算法是精确的,但是由于螺旋锥束 CT 投影重排为扇形束 CT 投影是近似的,所以螺旋锥束 CT 半覆盖扫描的加权 BPF 算法是近似的。

### 4 实验结果与讨论

对基于重排的螺旋锥束 CT 半覆盖扫描的加权 BPF (Rebinned-Weighted BPF, RWBPF) 算法,可通过仿真和实际数据验证其有效性,并将其结果与传统视场区域横截面全覆盖的螺旋锥束 FDK 算法<sup>[22]</sup>进行了对比。首先,用解析的方法获得 Shepp-Logan 模型的投影,仿真的参数如表 1 所示,然后分别用 RWBPF 算法和 FDK 算法重建各自的投影数据。实验环境为 Intel(R) Xeon (TM) 3.2 GHz CPU, 4.00 GHz 主内存。为比较 RWBPF 和 FDK 重建的效果,分别沿垂直于物体轴线的方向取出重建切片(如图 5 所示)并画出相同位置的重建曲线(如图 6 所示),然后比较 RWBPF 和 FDK 的重建时间(如表 2 所示)。

表 1 仿真参数

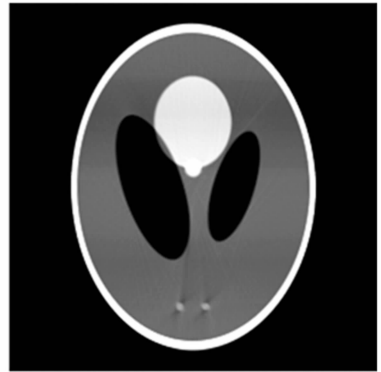
Tab. 1 Simulation parameters

参数	RWBPF	FDK
源到旋转轴距离 ( $R$ )	300.00 mm	
源到探测器距离 ( $D$ )	600.00 mm	
探测单元尺寸 ( $\Delta u \times \Delta v$ )	1.40 mm $\times$ 1.40 mm	
探测器尺寸 ( $W \times H$ )	253.40 mm $\times$ 197.40 mm	449.40 mm $\times$ 197.40 mm
探测器矩阵 ( $N_{\text{row}} \times N_{\text{col}}$ )	181 $\times$ 141	321 $\times$ 141
每圈投影数 ( $N$ )	360	
螺距 ( $h$ )	85.00 mm	
视场区域半径 ( $R_0$ )	100.00 mm	
物体长度 ( $L$ )	200.00 mm	
重建矩阵	256 $\times$ 256 $\times$ 256	



(a) FDK 重建

(a) Image reconstructed by FDK algorithm

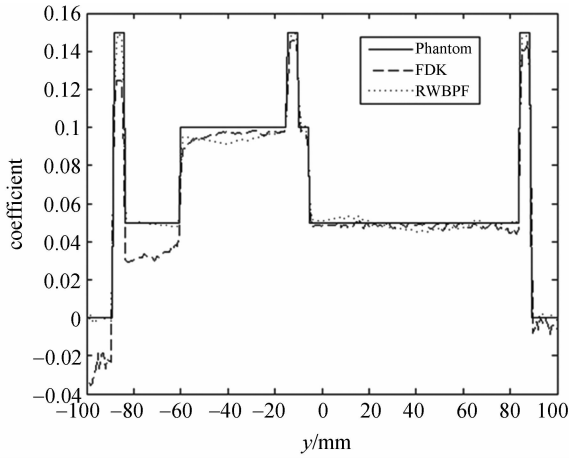


(b) RWBPF 重建

(b) Image reconstructed by RWBPF algorithm

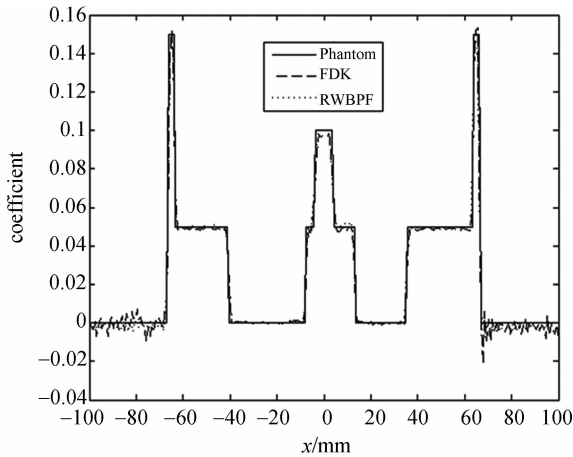
图 5 重建三维图像在  $z = -25.00$  mm 处的切片  
Fig. 5 Reconstructed slices at  $z = -25.00$  mm

由表 1 的参数可以看出,螺旋锥束 CT 半覆盖扫描使用探测器的宽度大约是传统螺旋的一半,因此这种半覆盖扫描可以大为减少射线的剂量。其次由图 5 可以看出,当螺旋锥束 CT 的螺距较大时,FDK 重建图像出现明显的伪影(如图 5(a)上方的箭头方向所示)。虽然螺旋锥束 CT 半覆盖扫描使用了更小的探测器,但是利用重排的加权 BPF 算法也可以重建出与使用大探测器相同视场区域的图像,而且当螺距较大时,重建的图像不存在 FDK 算法重建出的伪影(如图 5(b)所示)。为客观比较两种方法的效果,这里画出了两种算法的重建值在同一位置的重建曲线(如图 6 所示),并且计算了在该位置的均方误差 MSE<sup>[23]</sup>。图 6(a)所在直线上 FDK 算法重建值的 MSE 为  $4.185 \times 10^{-4}$ ,而 RWBPF 算法重建值



(a)  $x=0.00\text{ mm}, z=-25.00\text{ mm}$

(a) Profile at  $x=0.00\text{ mm}, z=-25.00\text{ mm}$



(b)  $y=7.45\text{ mm}, z=-25.00\text{ mm}$

(b) Profile at  $y=7.45\text{ mm}, z=-25.00\text{ mm}$

图 6 Shepp-Logan 模型的重建曲线

Fig. 6 Reconstructed profiles of Shepp-Logan

的 MSE 为  $6.147 \times 10^{-5}$ ; 在图 6(b) 所在直线上 FDK 算法重建值的 MSE 为  $1.450 \times 10^{-4}$ , 而 RWBPF 重建值的 MSE 为  $6.515 \times 10^{-5}$ 。由图 6 和 MSE 的结果看出, 当螺距较大时, RWBPF 算法的重建值比 FDK 算法的重建值更接近理论值。由表 2 可以看出, 这种基于重排的加权 BPF 算法的重建时间不到 FDK 算法的重建时间的 2/5。首先, 螺旋锥束半覆盖扫描的投影数据比传统的螺旋锥束的投影少很多。其次, 将螺旋锥束投影重排为扇形束投影后, 投影数据量和重建的

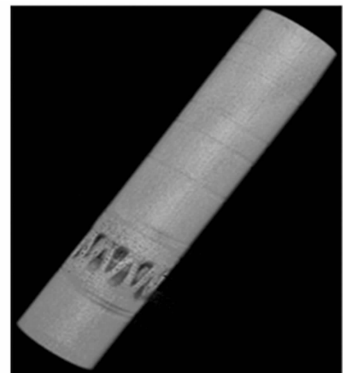
层数有关。假设物体重建的层数为  $N_z$ , 探测器矩阵为  $N_{row} \times N_{col}$ , 螺旋锥束每圈的采样数为  $N$ , 扫描圈数为  $N_t$ , 则螺旋锥束的投影数为  $N \times N_{col} \times N_{row} \times N_t$ , 而重排后的投影数为  $N \times N_{col} \times N_z$ 。一般来说  $N_z < N_{row} \times N_t$ , 所以重排后的投影数据量小于重排前的投影数据量。最后, 由于重排后各重建层之间的投影和图像是相互独立的, 使得 RWBPF 算法具有更好的并行性。

表 2 重建时间对比

Tab. 2 Comparison of reconstruction results

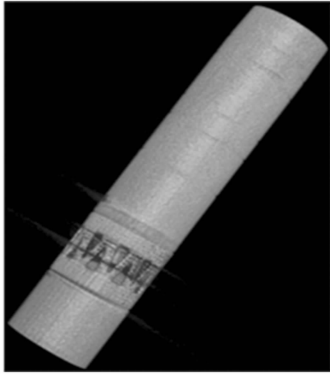
	FDK	RWBPF
仿真模型重建时间/s	539.078	198.198
实际数据重建时间/s	789.375	309.359

为验证本文方法对实际数据的有效性, 对一个圆筒形的物体进行了扫描和重建, 重建矩阵为  $256 \times 256 \times 378$ , 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切片及重建曲线。从图 7 可以看出, RWBPF 重建图像的伪影比 FDK 算法重建图像的伪影重, 这是由于 RWBPF 算法需要对投影求导, 而导数对噪声有放大作用, 这也正是诸如 Katsevich 算法、BPF 算法等精确重建算法尚未用于实际 CT 系统的原因之一。



(a) FDK 重建

(a) Image reconstructed by FDK algorithm

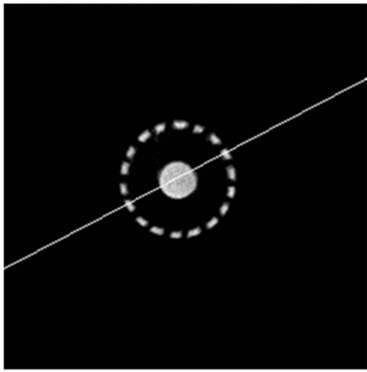


(b) RWBPF 重建

(b) Image reconstructed by RWBPF algorithm

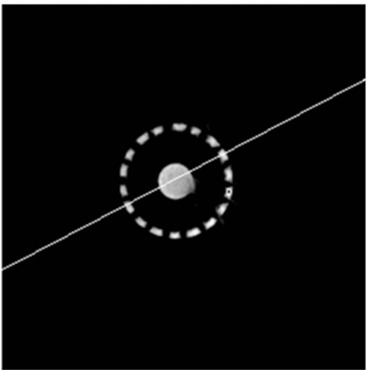
图 7 实际数据重建的三维效果图

Fig. 7 Three dimensional reconstruction images



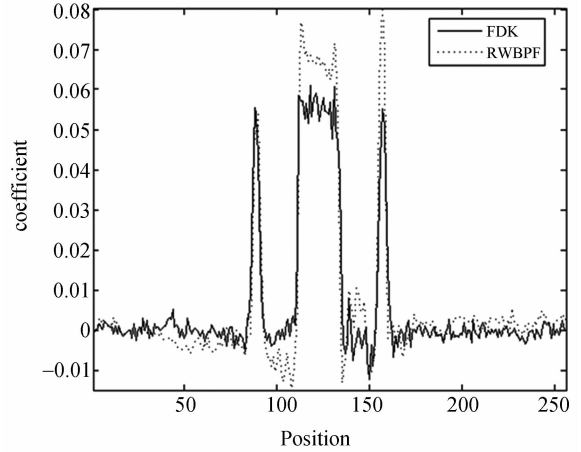
(a) FDK 重建

(a) Image reconstructed by FDK algorithm



(b) RWBPF 重建

(b) Image reconstructed by RWBPF algorithm



(c) 沿(a)(b)直线方向的重建曲线

(c) Profiles along white line of images (a) and (b)

图 8 实际数据重建切片图

Fig. 8 Reconstructed slices from real data

### 5 结 论

本文结合扇形束投影的特点和二维 BPF 算法可实现横向截断投影的重建,先将螺旋锥束 CT 半覆盖扫描的投影重排为二维扇形束半覆盖的投影,然后用加权的 BPF 算法重建。由于螺旋锥束 CT 半覆盖扫描使用更小的探测器,使得它的投影数据量更少,而且重排后使得投影数据量进一步减少。实验结果表明,这种基于重排的半覆盖螺旋锥束 CT 的 BPF 重建可以用小探测器实现较大物体的检测。与使用视场区域横截面全覆盖的传统螺旋锥束 CT 扫描的 FDK 算法相比,其重建时间不到 FDK 算法的 2/5。由仿真实验结果可知,当螺距较大时本文提出的基于重排的加权 BPF 算法的重建结果比视场区域横截面全覆盖的 FDK 算法更接近于理论值,均方误差至少减少一半。但是,由于实际投影数据中各种噪声的影响,使得基于重排的加权 BPF 算法的重建图像伪影比 FDK 算法重。如何解决 BPF 算法的噪声问题将是我们今后的研究内容。

CHEN P, PAN J X, LIU B. Computed tomography image edge degradation model and its application to image size measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(9):2269-2275. (in Chinese)

### 参考文献:

[1] 陈平,潘晋孝,刘宾. CT 图像边缘退化模型的建立及其在图像尺寸测量中的应用 [J]. *光学精密工程*, 2009,17(9):2269-2275.

[2] 刘露,刘宛予,楚春雨,等. 胸部 CT 图像中孤立性肺结节良恶性快速分类 [J]. *光学精密工程*,

- 2009,17(8):2060-2068.
- LIU L, LIU W Y, CHU C Y, *et al.* Fast classification of benign and malignant solitary pulmonary nodules in CT image [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(8):2060-2068. (in Chinese)
- [3] 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.*, 2005,11(Supp.):168-172. (in Chinese)
- [4] KUNZE H, DENNERLEIN F. Cone beam reconstruction with displaced flat panel detector [C]. *Proceeding of the 10th International Meeting on Fully Three-Dimensional Image Reconstruction in Radiology and Nuclear Medicine, Beijing, P. R. China*;2009:138-141.
- [5] 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.
- [6] 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*, 2003,19(1):115-118.
- FU J, LU H N. Bias scan mode for fan-beam X-ray ICT and its reconstruction algorithm [J]. *Optical Technique*, 2003,19(1):115-118. (in Chinese)
- [7] 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)
- [8] 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.
- [9] LENG S, ZHUANG T L, BRIAN E N, *et al.* Exact fan-beam image reconstruction algorithm for truncated projection data acquired from an asymmetric half-size detector[J]. *Physics in Medicine and Biology*, 2005,50:1805-1820.
- [10] WANG G. X-ray micro-CT with a displaced detector array [J]. *Med. Phys.*, 2002, 29(7):1634-1636.
- [11] 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, Barcelona*, 2003:803-806.
- [12] LI L, CHEN ZH Q, XING Y X, *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.
- [13] 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]. 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)
- [14] SCHAFFER D, GRASS M. Cone-beam filtered back-projection for circular X-ray tomography with off-center detector[C]. *Proceeding of the 10th International Meeting on Fully Three-Dimensional Image Reconstruction in Radiology and Nuclear Medicine, Beijing, P. R. China*; 2009:86-89.
- [15] CHO S, XIA D, PRSTDON E, *et al.* Half-fan-based region-of-interest imaging in circular cone-beam CT for radiation therapy[C]. *Proceeding of the 10th International Meeting on Fully Three-Dimensional Image Reconstruction in Radiology and Nuclear Medicine, Beijing, P. R. China*; 2009:385-388.
- [16] ZOU Y, PAN X C. An extended data function and its generalized backprojection for image reconstruction in helical cone-beam CT [J]. *Physics in Medicine and Biology*, 2004,49:N383-N387.
- [17] DEFRISE M, NOO F, KUDO H. A solution to the long-object problem in helical cone-beam tomography [J]. *Physics in Medicine and Biology*, 2000,45:623-643.
- [18] NOO F, DEFRISE M, CLACKDOYLE R. Single-slice rebinning method for helical cone-beam CT [J]. *Physics in Medicine and Biology*, 1999,44:561-570.
- [19] 陈炼, 吴志芳, 周立业. 一种改进的锥束螺旋 CT 单层重排重建算法[J]. *CT 理论与应用研究*, 2008,17(1):7-13.
- CHEN L, WU ZH F, ZHOU L Y. An improved single-slice rebinning algorithm for helical cone-beam CT [J]. *CT Theory and Applications*, 2008,17(1):7-13.
- [20] ZOU Y, PAN X C, SIDKY E Y. Image reconstruction in region-of-interest from truncated projections in a reduced fan-beam scan [J]. *Physics*

*in Medicine and Biology*, 2004,49:1-15.

- [21] LI L, CHEN Z Q, ZHANG L, *et al.*. A back-projection filtered image reconstruction algorithm for circular cone-beam CT [C]. *SPIE Medical Imaging*, 2006,6142:1-8.
- [22] WANG G, LIN T H, CHEN P C, *et al.*. A general cone-beam reconstruction algorithm [J].

*IEEE Transactions on Image Processing*, 1993,12(3):486-496.

- [23] SUN Y, HOU Y, HU J. Reduction of artifacts induced by misaligned geometry in cone-beam CT [J]. *IEEE Transactions on Biology Engineering*, 2007,54:1461-1471.

#### 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图像重建和数字图像处理的研究。E-mail: xiaobingzou@163.com

#### 通讯作者:



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

## MEMS 器件与电路共同仿真原型系统

苑伟政,牛昊彬,常洪龙,马炳和

(西北工业大学 陕西省微/纳米系统重点实验室,陕西 西安 710072)

为了预测 MEMS 器件与电路组成的完整 MEMS 系统的行为,建立了一个支持 MEMS 器件与电路共同仿真的原型系统。首先,根据 MEMS 系统级仿真与模拟电路仿真的共同特性,提出了 MEMS 器件与电路共同仿真的原理和方法,并依托国产电路仿真平台 Zeni VLG 建立了共同仿真原型系统的框架结构,然后分别根据修正节点分析方法和模拟电路行为级建模方法开发了该共同仿真原型系统所必需的两个参数化模型库。通过一个跷跷板式微加速度计分别与其开环电路和闭环带载波电路的共同仿真对原型系统和模型库进行了测试,开环仿真结果对比国外商业软件 Saber 的相对误差为 2.1%,表明原型系统能够有效进行 MEMS 器件与电路共同仿真,并且具有较高的精度。