

基于转角增量关系的 FDK 锥束重建改进算法

王 瑜¹, 欧宗瑛^{*1}, 王 峰², 郭明恩¹, 宋卫卫¹

(1. 大连理工大学 精密与特种加工教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024
2. 大连医科大学 第一临床学院 介入放射科, 辽宁 大连 116011)

摘要: 单圆形轨迹不能满足锥束投影精确重建的充要条件是经典 FDK 算法出现锥向衰减伪像的根本原因。通过斜平面转角增量关系的分析,推导出同锥角斜平面间转角及其增量的计算关系,进而得出 FDK 算法是对同锥角斜平面族上有限视角的投影数据进行重建,并且在滤波反投影重建过程中存在转角关系不匹配问题。针对上述两个问题,提出了一种利用转角及其增量关系对 FDK 算法进行改进的新方法,改进思路也进一步推广到 T-FDK 算法中。Shepp-Logan 模型的仿真实验结果表明在适中或较大锥角情况下,改进算法显著改善了 FDK 算法所存在的锥向衰减伪像。

关键词: 锥束重建; 圆形轨迹; 短扫描重建; FDK 算法; 滤波反投影

中图分类号: TP391.41; TG115.28 **文献标识码:** A

0 引言

锥束扫描利用锥形束射线源和面阵检测器在一次扫描周期内即可获取物体大量的投影信息,具有空间分辨率高、扫描速度快、射线利用率高等诸多优势。近几年,随着计算机和检测器技术的发展,CT 扫描快速地从扇束向锥束几何过渡^[1,2],促使锥束 CT 技术成为 CT 领域内的热点研究课题。

锥束重建算法是锥束 CT 研究的一项重要内容,其中最实用的是 FDK 算法^[3]。然而,由于 FDK 算法属于近似锥束重建算法,当锥角较大时,重建结果出现明显的锥向衰减伪像。产生该伪像的主要原因是单圆形扫描轨迹不能满足锥束精确重建的充要条件^[4]。为此,许多研究人员提出改进方法^[2,5-8],大致可归纳为两类,一类是增加扫描轨迹,包括圆加直线轨迹^[5]、圆加双弧轨迹^[6]、同心圆轨迹^[7]。额外的扫描轨迹增加了设

备设计制造的难度,并且除了同心圆轨迹外,其余重建算法也引入了精确的锥束重建公式,复杂了重建过程;另一类是利用重排思想进行改进,主要包括 T-FDK^[2]、FDK-Slant^[8] 算法。在执行重建前,该类算法需要将锥束投影数据重排为三维平行束投影,这就要求射源具有较高的采样率,否则会引进误差。目前,该类算法主要研究方向是提高重建结果的空间分辨率^[9]以及共轭锥顶射线的权重修正^[10-11]。不同以往算法,本文利用同锥角斜平面间的转角增量关系,提出一种改善锥向衰减伪像的新方法。

1 FDK 算法

FDK 算法是由 Feldkamp 等^[3]针对圆形轨迹平板检测器采集条件提出的一种近似锥束重建算法,该算法实际上是二维扇束重建公式在三维空间中的推广,其原理如图 1 所示。

收稿日期: 2005-06-10; 修回日期: 2006-12-22。
基金项目: 辽宁省高等学校科学研究青年基金资助项目(2004F057)。
作者简介: 王 瑜(1972-),女,博士生;欧宗瑛*(1936-),男,教授,博士生导师。
©1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

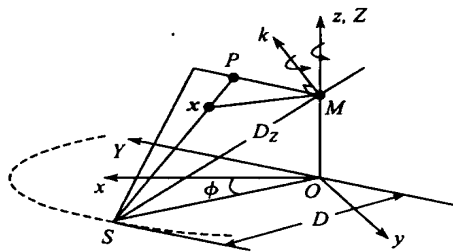


图 1 FDK 算法的原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the FDK algorithm

为讨论方便使用虚拟检测器并进行下述定义:源点轨迹所在的平面称为中平面;除中平面外,源点与检测器的水平阵列所形成的平面称为斜平面;源点投影到检测器中心位置,两者间的方向为主投影方向; M 点表示斜平面与 z 轴的交点,源点 S 与 M 点的连线为斜投影方向;与中平面夹角相等的斜平面称为同锥角斜平面,它们构成的集合称为同锥角斜平面族。

相对二维扇束重建公式, FDK算法在推导时针对一个投影角度上的斜平面考虑了 3 个方面的改变: 首先, 中平面与斜平面的几何相似性引起的改变; 其次, 斜平面的转轴选择为 k 轴, 该轴过 M 点且垂直于斜平面; 最后, 计算斜平面绕 k 轴转角增量 $d\Omega$ 与中平面转角增量 dO 的关系, 即

$$dQ = \frac{D}{D^2 + Z^2} dO \quad (1)$$

经过上述的改进后, FDK重建公式可以表达为

$$f(\mathbf{x}) = \int_0^{2\pi} \frac{1}{U^2(\mathbf{x}, O, D)} \tilde{P}(O, Y, Z) dO \quad (2)$$

式中

$$\mathcal{P}(O, Y, Z) = \left[\frac{D}{D^2 + Y^2 + Z^2} P(O, Y, Z) \right] \otimes_{h(Y)} \quad (3)$$

(Y, Z) 表示检测器局部坐标系, 其坐标值是重建点 $\mathbf{x} = (x \ y \ z)$ 的反投影地址; $P(Q, Y, Z)$ 表示当源点的角度位置为 Q 时重建体在检测器上的投影; $h(\cdot)$ 表示斜滤波核函数; $\otimes$ 表示卷积运算符; $D / \sqrt{D^2 + Y^2 + Z^2}$ 称为预权重因子; $U(\mathbf{x}, Q, D)$ 称为后权重因子。

2 FDK算法中转角及其增量的分析

FDK锥束重建公式在推导时,仅考虑在一个

投影方向上,斜平面与中平面之间几何相关性及转角增量关系,并没有进一步分析锥束投影沿圆周方向连续转动过程中,上述两个关系可能对重建公式的修正所产生的影响.因此,FDK算法是通过对二维扇束重建公式静态分析所获得的重建公式.

如图 2 所示, S_1 和 S_2 表示源点轨迹上两个相邻位置; S_1M 和 S_2M 分别表达相邻同锥角斜平面上的斜投影方向; dO 表示中平面上的转角增量, dQ 表示相邻斜投影方向的夹角. 当 dQ 较小时, 相邻两个同锥角斜平面可认为近似处于同一个平面上, 根据它们之间的几何关系, 可推导出与式 (1) 相同的表达关系. 该结果表明: 绕 k 轴旋转的斜平面转角增量实际上等价于相邻同锥角斜平面的斜投影方向绕 z 轴旋转的转角增量. 因此, 在随源点绕转轴连续转动过程中, 斜平面的前继和后续平面分别为其前后相邻的同锥角斜平面. 从而, 所有相同锥角的斜平面所构成的集合可看成为一个连续近似平面. 由于它们与参考坐标系统的 z 轴相交于同一点, 则连续近似平面可由检测器局部坐标系统的 Z 坐标来标识, 进而 Z 位置连续近似平面表达成与 Z 轴交点坐标为 $(0, Z)$ 的同锥角斜平面所构成的集合.

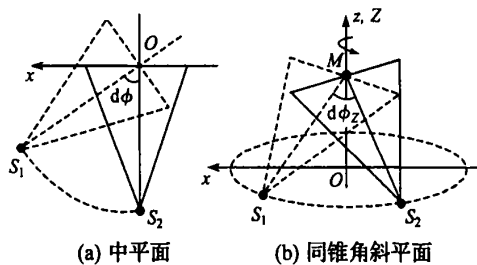


图 2 转角增量关系示意图

Fig. 2 Relationship of rotation angle increment

既然 FDK 算法是利用中平面上的二维扇束重建公式推导出斜平面上三维锥束重建公式,则对应于在中平面进行的二维扇束滤波反投影重建过程, FDK 算法的重建过程必然在同锥角斜平面张成的连续近似平面上进行,并且其转角增量关系满足式 (1). 从而,可分析得到关于连续近似平面的两个引理:

引理 1 当源点旋转 θ 角时, z 位置处的连续

近似平面旋转了 Q 角度,两者的关系为

$$Q = -\frac{D}{D^2 + Z^2}O \tag{4}$$

引理 2 源点绕 z 轴旋转一周时,连续近似平面周转角小于 2π ,且 Z 坐标越大,旋转角度越小.

引理 1 表明在一个投影角度上,不同 Z 位置的连续近似平面的转角是不同的,仅为中平面转角的 $D \backslash \sqrt{D^2 + Z^2}$ 倍. FDK 算法重建公式的角度关系推导时,仅考虑了 dQ 的变化,而没有考虑同锥角斜平面间的相关性,从而忽略锥束投影重建过程中不同连续近似平面的转角 Q 也发生的变化. 因此,FDK 算法仅仅是一个投影角度上的静态分析结果,当运用到连续旋转的重建过程,出现转角关系不匹配的问题.

引理 2 表明由于连续近似平面周转角小于 2π ,相当于在 2π 范围内采集了有限视角的投影数据. 随着 Z 坐标增大相应的周转角越小于 2π ,有限视角的投影效应越高,重建值也就越低于精确值. 因此,在这个意义上,FDK 算法对有限视角的投影数据进行重建.

3 FDK 算法的改进

通过上述转角增量关系的连续分析,对 FDK 算法而言,需要解决转角关系不匹配和有限视角的两个问题. 由于 FDK 短扫描重建算法^[12]属于有限视角的投影重建算法,在一定程度上可减弱连续近似平面上有限视角的投影重建所引起的负面影响. 当 FDK 算法引入短扫描窗函数后,其重建公式中与转角 O 相关的量有: 预权重因子、斜滤波核函数、修正因子以及窗函数,它们都应该用相应的 Q 角来代替. 然而,除窗函数外,其余三项都是 (Y, Z) 的函数,而在投影角度为 O 时, (Y, Z) 与重建点间满足透视映射关系. 如果直接进行转角替代,就需要修正这种透视映射关系,增加了函数计算关系的复杂度. 因此,为避免上述问题,分两步提出了对 FDK 算法的改进,并进一步将改进措施推广到 T-FDK 算法中.

3.1 全周轨迹 FDK 改进算法

FDK 算法利用中平面和斜平面间的几何相

似性推导出透视映射关系,该关系在单一投影角度上是正确的,并且根据这种关系推导出的重建公式,计算关系简单,重建速度快. FDK 算法在作为一种近似重建算法,小锥角范围内所获得的重建结果较精确. 因此,在保持 FDK 算法的基本形式下,为避免映射重建点引起的复杂性,从 dQ 角度,首先提出对全周轨迹下 FDK 算法的近似修正.

当源点转过 O 角后,FDK 算法认为各连续近似平面也同时转过 O 角,即 $Q = O$. 上述关系当且仅当

$$dQ = dO \tag{5}$$

成立. 为保持重建公式的基本形式,则须用式 (5) 来代替原来重建公式推导时所使用的式 (1). 于是,投影数据的预权重滤波变为

$$P^{FC}(O, Y, Z) = \left[\frac{\overline{D^2 + Z^2}}{D^2 + Y^2 + Z^2} P(O, Y, Z) \right] \otimes h(Y) \tag{6}$$

从而获得了圆周轨迹 FDK 改进算法,简记为 FC FDK,其重建公式为

$$f(x) = \int_0^{2\pi} \frac{1}{U^2(x, O, D)} \tilde{P}^{FC}(O, Y, Z) dO \tag{7}$$

式 (3) 与 (6) 的差别是预权重因子的分子项,由 D 变为 $\overline{D^2 + Z^2}$. 因此,改进后的重建式 (7),当 $Z = 0$ 时,在中平面上的重建结果仍然是精确的,并且随着 Z 的增大,投影数据的预权重滤波值也增大,从而有利于减弱低密度衰减伪像.

3.2 短扫描轨迹 FDK 改进算法

选择 Parker 权重函数^[13]作为短扫描轨迹下的窗函数,它是在预权重和斜滤波之前直接对投影数据进行修正,与重建点的位置不发生关联. 因此,可使用 Q 值替代窗函数中相应的 O 值. 在锥束投影下,利用转角关系修正后的 Parker 权重函数为

$$k_Q(T_Z) = \begin{cases} \sin^2\left[\frac{\pi}{4} \frac{Q_Z}{T_{mZ} - T_Z}\right]; & 0 \leq Q_Z \leq 2T_{mZ} - 2T_Z \\ 1; & 2T_{mZ} - 2T_Z \leq Q_Z \leq \pi - 2T_Z \\ \sin^2\left[\frac{\pi}{4} \frac{\pi + 2T_{mZ} - Q_Z}{T_{mZ} + T_Z}\right]; & \pi - 2T_Z \leq Q_Z \leq \pi + 2T_{mZ} \\ Q_{其他} \end{cases} \tag{8}$$

式中各符号的含义如图 3 所示。 $\mathbb{T}_z$ 表示斜平面上扇角采样值； $\mathbb{T}_{mz}$ 表示在斜平面上最大半扇角值。依据 Parker 窗函数源点扫描范围条件,连续近似平面上的最大转角应该满足 $\mathbb{Q}_{mz} \geq \pi + 2\mathbb{T}_{mz}$ 。然而,利用引理 1 和 2 可推导出:当中平面上的最大转角满足 Parker 扫描范围条件时,不同 Z 位置处的连续近似平面,其最大转角范围小于 $\pi + 2\mathbb{T}_{mz}$ 。为此,增大中平面上的最大半扇角值 $\mathbb{T}_m$ 。实际上, $\mathbb{T}_m$ 的取值需要满足一定的条件,本文仅给出推导计算结果, $\mathbb{T}_m$ 计算关系为

$$\mathbb{T}_m = \left[\frac{\pi}{2} + \arctan \left(\frac{L}{D^2 + L^2} \right) \right] \frac{\overline{D^2 + L^2}}{D} - \frac{\pi}{2} \tag{9}$$

其中,假定检测器为等边长, L 表示检测器的半长度。根据 $\mathbb{T}_m$ 值,可以计算斜平面上相应的 $\mathbb{T}_{mz}$ 值。

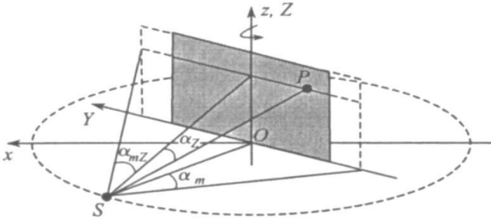


图 3 短扫描参数示意图
Fig. 3 Parameters of half-scan trajectory

窗函数中的参变量修正后,结合式 (6) 的改进,投影数据的预权重滤波变为

$$\mathcal{P}^{\text{SC}}(O, Y, Z) = \left[\frac{\overline{D^2 + Z^2}}{D^2 + Y^2 + Z^2} k_{\mathbb{T}_z}(\mathbb{T}_z) P(O, Y, Z) \right] \otimes h(Y) \tag{10}$$

进而获得了短扫描轨迹 FDK 改进算法,简记为 SCFDK,其重建公式为

$$f(\mathbf{x}) = \int_0^{\mathbb{Z}} \frac{1}{U^2(\mathbf{x}, O, D)} \mathcal{P}^{\text{SC}}(O, Y, Z) dO \tag{11}$$

3.3 T-FDK算法的改进

通过重排操作,锥束投影可变换为三维平行束投影, T-FDK 和 FDK-Slant 算法可对重排后的投影数据进行重建。由于具较高重建质量及运算速度等优点, T-FDK 算法得到了实际的应用。因此,对 T-FDK 算法提出改进,以进一步验证转角增量关系改进措施的有效性。

T-FDK 算法的重建公式可表达为

$$f(\mathbf{x}) = \int_0^{\mathbb{Z}} \left[\frac{\overline{D^2 - Y^2}}{D^2 + Z^2 - Y^2} P^p(O, Y, Z) \right] \otimes h(Y) dO \tag{12}$$

式中 $P^p(O, Y, Z)$ 表示重排后的投影数据,预权重因子 $\overline{D^2 - Y^2} \setminus \overline{D^2 + Z^2 - Y^2}$ 是投影射线与中平面夹角的余弦值。考虑 3.1 和 3.2 的改进措施,一个是对 FDK 重建公式中的预权重因子乘以 $\overline{D^2 + Z^2} \setminus D$,称其为转角因子;另一个是修正短扫描窗函数中的转角值。由于 Parker 窗函数的目的是光滑修正双采样的投影数据,而如同二维平行束重排算法,三维平行束重排算法相当于已完成关于冗余数据的修正。因而,对 T-FDK 算法的改进,仅需要预权重因子乘以相应的转角因子。实验研究发现使用 (0, 1.0) 区间的松弛因子 κ 修正转角因子中 Z 变量,能够获得更好的重建结果。改进后的算法简记为 MT-FDK,其重建公式为

$$f(\mathbf{x}) = \int_0^{\mathbb{Z}} \left[\frac{\overline{D^2 + (\kappa Z)^2} \overline{D^2 - Y^2}}{D \overline{D^2 + Z^2 - Y^2}} P^p(O, Y, Z) \right] \otimes h(Y) dO \tag{13}$$

4 实验结果与分析

利用三维低对比度的 Shepp-Logan 模型进行仿真模拟对比研究。投影数据使用解析方法产生,投影数据在轴向方向无截断,切片图像窗口显示范围为 [1, 1.04]。使用两组不同锥角的投影数据,相应的锥束扫描参数列在表 1 中。

表 1 锥束扫描参数

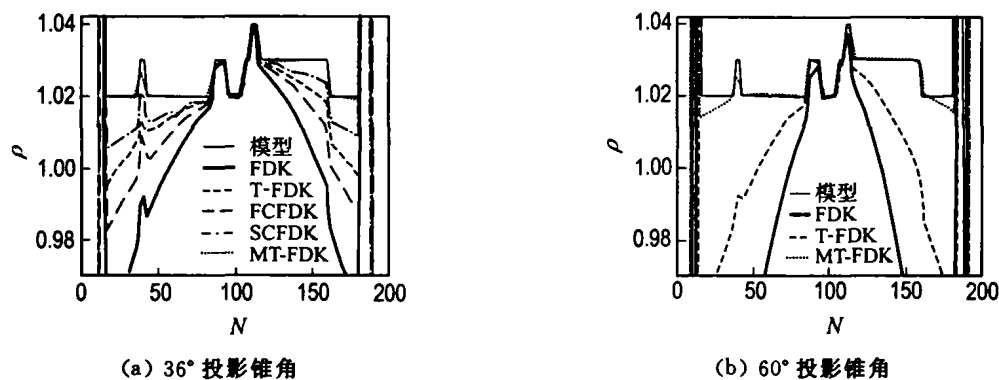
Tab. 1 Cone-beam scanning parameters

最大投影锥角	源点轨迹半径 /l. u.	采集投影数	检测器长度 /l. u.	检测器分辨率	重建物体支撑半径 /l. u.	重建物体分辨率
≈ 36°	3.26	512	2.12	212× 212	1.0	200× 200× 200
≈ 60°	2.0	512	2.32	232× 232	1.0	200× 200× 200

第一组实验使用锥角为 36° 的投影数据, 对比的算法有 FDK T-FDK FCFDK SCFDK 和 MT-FDK. 之所以使用该角度的投影数据, 是因为超过该角度后, SCFDK 重建算法会出现严重的不对称伪像. 图 4(a) 示出模型以及算法重建结果的密度曲线. 图 5 示出相应的切片图像. 从图 5 中可以看出: 随着锥角的增大, FDK 算法出现明显的锥向衰减伪像; FCFDK 改进算法减弱了锥向衰减伪像, 但改进程度不如 T-FDK 算法; SCFDK 改进算法比 T-FDK 算法的锥向衰减伪像小, 但其轴向切片出现轻微不对称的伪像; 而 MT-FDK 改

进算法几乎精确地重建出原来的图像. 图 4(a) 的密度曲线定量地表达上述的重建结果, 特别是 MT-FDK 算法与模型的密度曲线几乎完全重合.

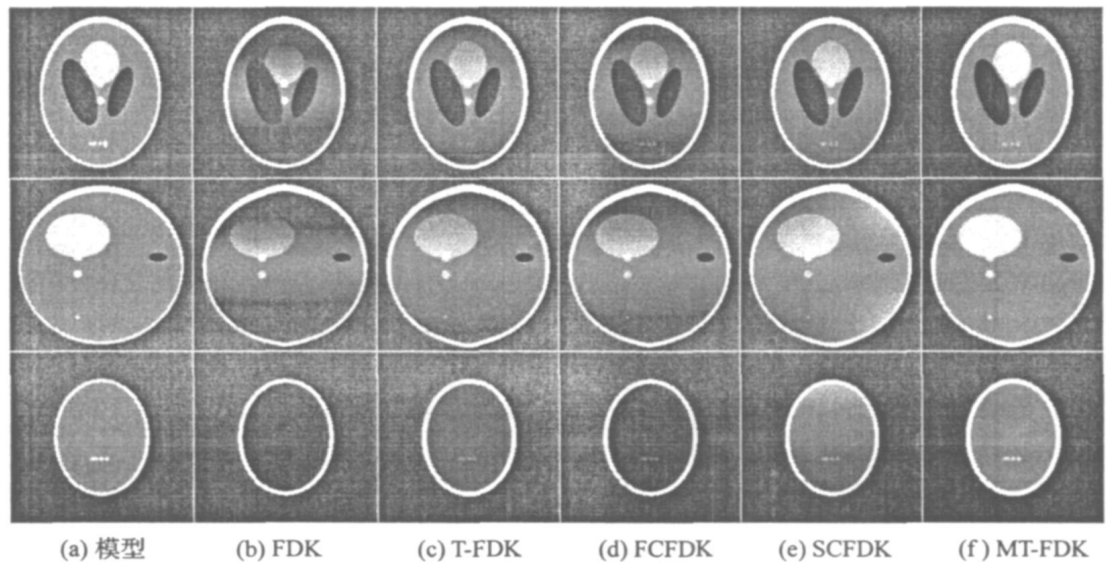
第二组实验使用锥角为 60° 的投影数据, 比较算法为 FDK T-FDK 和 MT-FDK 算法. 图 4(b) 示出了算法重建结果的密度曲线. 图 6 示出相应的切片图像. 重建结果表明当投影锥角较大时, MT-FDK 算法仍然可以取得较好的结果. 在两组实验中, MT-FDK 算法中 κ 取值为常数 0.85. 可以预见当锥角加大时, 变化选择 κ 可以更好弥补当锥角较大时出现的轻微锥向衰减.



(在 $y = -0.25 \text{ l.u.}$, $z = 0$ 的直线上; N 为像素位置, d 为密度值)

图 4 Shepp-Logan 模型和重建结果的密度曲线比较

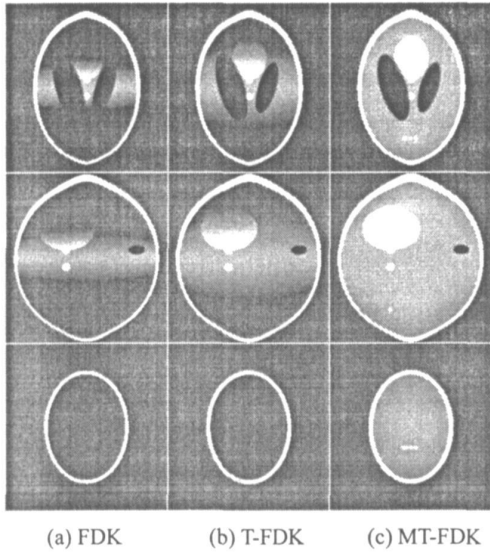
Fig. 4 Comparison of 3D Shepp-Logan phantom with reconstruction results for intensity curve



注: 从上到下切片图像的位置分别为 $y = -0.25 \text{ l.u.}$, $x = 0$ 和 $z = -0.60 \text{ l.u.}$

图 5 投影锥角 36° 时, Shepp-Logan 模型和 5 种算法重建结果的切片图像比较

Fig. 5 Comparison of 3D Shepp-Logan phantom with five reconstruction results for slice images at 36° cone angle



注: 从上到下切片图像的位置分别为 $y = 0.25 \text{ l.u.}$, $x = 0$ 和 $z = -0.60 \text{ l.u.}$

图 6 投影锥角 60° 时, 三种算法重建结果的切片图像比较

Fig. 6 Comparison of three reconstruction results for slice images at 60° cone angle

实验结果说明: 相对 FDK 算法, FCFDK 算法减小了锥向衰减伪像, 表明了利用修正的转角增量关系对 FDK 算法近似改进的有效性; 在锥角较小时, SCFDK 算法通过修正 Parker 窗函数中与重建点无直接关系的转角对 FCFDK 算法的进一步改进, 获得比 T-FDK 算法更好的重建结果, 表明短扫描算法可以弥补连续近似平面的有限视角投影所带来的负面影响; 利用转角增量关系对 T-FDK 算法提出改进, 在较大的锥角情况下, 仍可以较精确重建出模型图像, 表明了重排操作相当于对投影数据进行 Parker 窗函数的权重修正, 也可以减弱连续近似平面的有限视角投影. 实验结果及以上的分析表明了基于增量关系的改进方法的有效性. 充分说明 FDK 算法由于缺乏对斜平面转动的动态分析, 进而忽略了同一投影角度上中平面与斜平面间的转角关系, 导致其出现锥向衰减伪像.

5 结 语

将 FDK 算法在一个投影方向上对斜平面推导出的转角增量关系, 推广到由同锥角斜平面张

成的连续近似平面空间中加以考虑. 在该空间中, FDK 算法对有限视角的投影数据进行重建, 在重建过程中存在转角关系不匹配的问题. 依据 FDK 重建公式中与转角相关的量是否同重建点存在依赖关系以及短扫描重建特点的两方面, 分圆周和短扫描轨迹两步提出对 FDK 算法的改进, 改进思路也进一步推广到 T-FDK 算法中. 实验结果表明每步改进的重建结果都逐步逼近模型数据值, 特别是对 T-FDK 算法的改进, 当锥角较大时, 仍然可以获得较精确的重建结果. 研究结果表明, 缺乏对斜平面转动的连续分析是导致 FDK 算法出现锥向衰减伪像的主要原因.

尽管单圆轨迹不满足锥束精确重建的条件, 通过采取有效修正方法, 在保持滤波反投影的优势前提下, FDK 类型算法能够较精确地重建单圆轨迹下低密度物体. 本文的研究对扩大 FDK 算法在实际工程中的适用范围具有重要意义.

参考文献:

- [1] WANG G, CRAWFORD C R, KALENDER W A. Multirow detector and cone-beam spiral/helical CT [J]. *IEEE Trans Med Imag*, 2000, **19**: 817-821
- [2] GRASS M, KÖHLER T, PROKSA R. 3D cone-beam CT reconstruction for circular trajectories [J]. *Phys Med Biol*, 2000, **45**: 329-347
- [3] FELDKAMP L A, DAVIS L C, KRESS J W. Practical cone beam algorithm [J]. *J Opt Soc Amer A*, 1984, **1**: 612-619
- [4] GRANGEAT P. Mathematical framework of cone-beam 3D reconstruction via the first derivative of the Radon transform [C] // *Proceedings of Conference on Mathematical Methods in Tomography*. Berlin: Springer-Verlag, 1991: 66-97
- [5] HU H. Exact regional reconstruction of longitudinally unbounded object using the circle-and-line cone beam tomographic system [J]. *Proc SPIE*, 1997, **3032**: 441-444
- [6] NING R, TANG X Y, CONOVER D. Flat panel detector-based cone beam computed tomography with a circle-plus-two-arcs data acquisition orbit Preliminary phantom study [J]. *Med Phys*, 2003,

30 1694-1705

- [7] ZENG K, CHEN Z Q, ZHANG L, *et al.* An error-reduction-based algorithm for cone-beam computed tomography [J]. **Med Phys**, 2004, **32**: 3206-3212
- [8] TURBELL H. Cone-beam reconstruction using filtered backprojection [D]. Sweden: Linköping University, 2001
- [9] YU L, PAN X, PELIZZARI A. Image reconstruction with a shift-variant filtration in circular cone-beam CT [J]. **Int J Imag Syst Tech**, 2004, **14**: 213-221
- [10] GRASS M, KOHLER T, PROKSA R. Angular weighted hybrid cone-beam CT reconstruction for circular trajectories [J]. **Phys Med Biol**, 2001, **46**

1595-1610

- [11] TANG X Y, HSIEH J, HAGIWARA A, *et al.* A three-dimensional weighted cone beam filtered backprojection (CB-FBP) algorithm for image reconstruction in volumetric CT under a circular source trajectory [J]. **Phys Med Biol**, 2005, **50**: 3889-3905
- [12] GULLBERG G, ZENG G. A cone-beam filtered backprojection reconstruction algorithm for cardiac single photon emission computed tomography [J]. **IEEE Trans Imag**, 1992, **11**: 91-101
- [13] PARKER D. Optimal short scan convolution reconstruction for fan beam CT [J]. **Med Phys**, 1982, **9**: 254-257

Modified FDK cone-beam reconstruction algorithm based on relationship of rotation angle increment

WANG Yu¹, OU Zongying^{* 1}, WANG Feng², Guo Ming'en¹, SONG Weiwei¹

(1. Key Lab. for Precis. & Nontradit. Mach. Technol. of Minist. of Edu., Dalian Univ. of Technol., Dalian 116024, China;

2. Dept. of Interv. Radiol., First Affi. Hosp., Dalian Med. Univ., Dalian 116011, China)

Abstract Due to the incomplete data set for exact cone-beam reconstruction with a circular scan trajectory, the FDK algorithm produces artifact of the intensity drop with increasing cone angle. First, the relationship of the rotation angle increments in the tilted plane was investigated. And then, the value of the rotation angle is obtained in any family of the tilted planes which has the same cone angle relative to the midplane. As a result, there are two important details ignored by the classical FDK algorithm. One is the limited-angle projection data acquired in a family of the tilted planes. The other is the difference of rotation angle between the midplane and the tilted plane at the same projection angle. Therefore, based on these two aspects, a modified method is proposed for the FDK algorithm using the relationship of the rotation angle increment. Also, the same idea is applied to the T-FDK algorithm. Computer-simulated studies show that the proposed algorithms effectively reduce the artifact of the intensity drop inherent to the FDK algorithm at appropriate or big cone angle.

Key words cone-beam reconstruction; circle trajectory; short-scan reconstruction; the FDK algorithm; filtered backprojection