

数字合成 X 线体层成像中轴向强度衰减的校正

缪 辉 赵会娟 高 峰 周仲兴

(天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072)

摘要 作为新型医学成像技术,数字合成 X 线体层成像(DTS)技术有助于分辨重叠的成像组织并精确定位组织病变。DTS 技术采用重建速度快、图像质量高的滤波反投影算法重建出冠断面的断层图像。但由于 DTS 投影数据集的不完整性,因此利用滤波反投影算法重建出的图像其强度在旋转轴方向上存在着类似帽状衰减现象。分析了 X 线源锥束角度对 DTS 图像中轴向强度衰减的影响,在此基础上引入了一种反余弦加权的强度衰减的校正方法。为验证校正方法对降低 DTS 图像中轴向强度衰减的效果,利用搭建的 DTS 系统在不同的 X 线源锥角下对乳房仿体进行了实验。结果表明,该校正方法能有效地降低 DTS 重建图像中的轴向强度衰减程度。

关键词 生物光学;数字合成 X 线体层成像;轴向强度;衰减校正;锥束重建;校正算法

中图分类号 R814.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0104002

Correction of Axial Intensity Drop for Digital Tomosynthesis Reconstructed Image

Miao Hui Zhao Huijuan Gao Feng Zhou Zhongxing

(College of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract As a new and developing medical imaging technique, the digital tomosynthesis imaging (DTS) can provide researchers with confidence to distinguish the overlapping lesion tissue and make exact lesion-localizing. DTS employs the filtered backprojection algorithm for its rapid reconstruction speed and high reconstruction quality and reconstructs a series of the coronal images. However, the digital tomosynthesis insufficient dataset causes the hat-like intensity drop in its filtered backprojection reconstructed images along the rotation axis. The cone angle impact on the digital tomosynthesis axial intensity drop is analyzed and a reciprocal-cosine weighted intensity correction is introduced. To validate the effect of the axial intensity drop correction method, a DTS system is designed and built up and the anthropomorphic breast phantom is reconstructed with the reciprocal-cosine weighted correction method under different cone angle respectively. The reconstruction results demonstrate that the correction method can effectively minimize the axial intensity drop in digital tomosynthesis reconstructed images.

Key words biological optics; digital tomosynthesis imaging; axial intensity drop; attenuation correction; cone-beam reconstruction; correction algorithm

OCIS codes 170.3880; 100.3010; 100.6950; 110.7440

1 引 言

近年来,数字合成 X 线体层成像(DTS)已经被证明是医疗早期病变诊断的有效工具和手段^[1,2]。随着数字平板探测器技术的不断完善,DTS 因其对组织重叠成像的分辨能力、较高的诊断准确性以及较低的复查率,而得到越来越多医学成像研究者的

关注^[2,3]。

DTS 技术以传统体层成像的几何原理为基础,只需要有限角度下的有限个投影图像数据即可利用滤波反投影算法重建出成像物体的任意冠断面断层图像。因此,相对于传统的电子计算机 X 射线断层扫描(CT)技术,DTS 可在很大程度上降低患者所

收稿日期: 2011-07-26; **收到修改稿日期**: 2011-10-09

基金项目: 国家自然科学基金(30970775)、国家 863 计划(2009AA02Z413)和天津市自然科学基金(09JCZDJC18200, 10JCZDJC17300)资助课题。

作者简介: 缪 辉(1983—),男,博士研究生,主要从事医学 X 射线成像方面的研究。E-mail: miaohui@tju.edu.cn

导师简介: 赵会娟(1963—),女,博士,教授,主要从事生物医学光子学及医学成像等方面的研究。

E-mail: huijuanzhao@tju.edu.cn(通信联系人,中国光学学会会员号:S040m563S)

受 X 射线的辐射剂量。

由于 DTS 投影数据集的不完整性,因此利用滤波反投影算法重建时,其图像强度在物体的旋转轴方向上存在着类似帽状衰减现象。本文在分析 X 线源锥角对 DTS 图像中轴向强度衰减的影响基础上,研究了一种降低轴向强度衰减的校正方法,并分别利用数字模拟和搭建的 DTS 系统验证了本校正方法对 DTS 图像中轴向强度衰减的修正效果。

2 X 线源锥角对轴向强度衰减的影响与校正方法

2.1 对轴向强度衰减的影响

在 DTS 中,物体的投影是 X 线源沿一条圆弧线对成像物体进行扫描成像所获得的,在此基础上,利用三维锥束重建算法和所有扫描角度下的投影重建出成像物体的一系列冠断面断层图像。作为近似锥束重建算法,在锥束三维成像技术中由扇束滤波反投影重建衍生出的 Feldkamp-Davis-Kress(FDK)算法可使用不完全扫描轨迹,且仅需一维滤波,故具有重建速度快、重建图像质量高等优点^[4,5]。因此,具有圆弧扫描轨迹的 DTS 中 FDK 算法同样被广泛地采用^[1,2]。一般地说,FDK 重建算法包含三个步骤:1)对投影数据进行加权以修正体素到源点的距离和角度差;2)对不同角度的投影数据进行水平方向一维滤波;3)通过体素所有方向射线贡献之和沿 X 射线方向进行反投影重建^[6,7]。DTS 重建几何关系如图 1 所示。

设任意三维成像物体体素坐标 (x, y, z) 在平板探测器上的投影坐标为 (u, v) , 根据相应的 DTS FDK 重建算法,沿 X 线光轴给定深度 y_0 的冠断面断层图像 $f(x, y_0, z)$ 可表示为^[8~10]

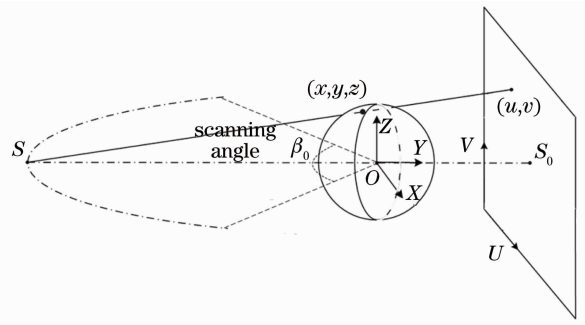


图 1 DTS 重建几何关系

Fig. 1 Schematic diagram of the geometric relation of the DTS

$$f(x, y_0, z) = \int_{-\beta_0/2}^{\beta_0/2} \frac{D^2}{(D-s)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{D}{\sqrt{D^2 + u^2 + v^2}} \times P(u, v, \beta) \cdot H\left(\frac{Dt}{D-s} - u\right) dud\beta, \quad (1)$$

式中 β 表示反投影重建的角度,且 $s = -x \sin \beta + y \cos \beta$ 和 $t = x \cos \beta + y \sin \beta$; β_0 为 DTS 的扫描角度大小; D 表示 X 线源到成像物体旋转中心的距离; $P(u, v, \beta)$ 为扫描角度 β 下投影坐标 (u, v) 对应的投影值; $H(\cdot)$ 表示沿水平 U 方向的一维 Ramp 滤波函数。

为了分析了 X 线源锥束角度对 DTS 图像中轴向强度衰减的影响,以一个密度均匀球体模型作为成像物体进行模拟实验,分别在 X 线源锥角为 $10^\circ, 20^\circ$ 和 30° 下进行 DTS 重建。DTS 重建图像大小为 $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$, 重建像素大小为 $0.1 \text{ mm} \times 0.1 \text{ mm}$ 。图 2 分别给出了 X 线源锥角为 $10^\circ, 20^\circ$ 和 30° 下 DTS 重建图像与球模型的冠状面图像的对比。

以图 2 中的轴向扫描线(图中虚线)处的图像强度作为纵坐标,图 3 给出了球模型和不同 X 线源锥

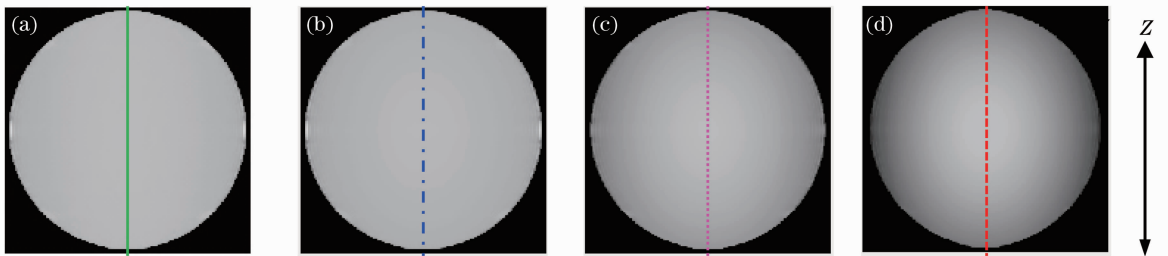


图 2 不同 X 线源锥角下球模型的冠状面图像与 DTS 重建图像的对比。(a)球模型的冠状面图像;(b) 10° 锥角的重建图像;(c) 20° 锥角的重建图像;(d) 30° 锥角的重建图像

Fig. 2 Comparison of the sphere sagittal image and the digital tomosynthesis reconstructed images under different X-ray cone angles. (a) Sphere sagittal image; (b) reconstructed image under 10° ; (c) reconstructed image under 20° ; (d) reconstructed image under 30°

角下 DTS 重建图像的轴向扫描线重建强度归一化后的对比。

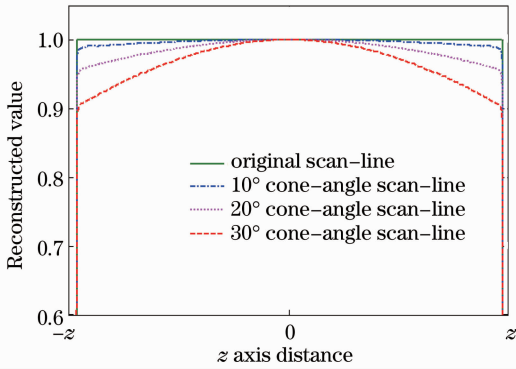


图 3 球模型与不同 X 线源锥角下 DTS 重建图像的轴向扫描线处的重建强度对比

Fig. 3 Axial center-line intensity comparison of the sphere sagittal image and the digital tomosynthesis reconstructed images under different X-ray cone angles

由图 3 可知,对于给定 X 线源锥角下的 DTS 重建图像,重建体素强度在物体旋转轴方向上呈现类似帽状的衰减现象,即重建强度随着对应的重建体素逐渐远离旋转轴中心而下降。另外,随着 X 线源锥角增大,重建图像中轴向强度衰减对重建影响增大。

DTS 研究发展趋势是对较大物体进行断层成像,且相同源探测距离情况下,对较大物体进行成像势必导致 X 线源锥角的增大^[7,8]。因此 DTS 重建必须考虑 X 线源锥角效应,并对轴向的强度衰减进行必要的修正^[11~13]。

2.2 轴向强度衰减的校正方法

为了定量分析描述衰减特性,帽状强度衰减通常被近似地指定为一些常用的衰减函数,例如:斜率函数、高斯函数或者余弦函数等^[12,13]。

根据 DTS 图像的帽状强度衰减的特点,其强度衰减函数近似为余弦函数,故利用反余弦函数加权方法消除帽状强度衰减对重建图像的影响。反余弦加权校正系数可表示为

$$W(x, y_0, z) = \frac{1}{\cos[C_1 z / (D - C_2 \sqrt{x^2 + y_0^2 + z^2})]}, \quad (2)$$

式中 C_1, C_2 分别为反余弦加权校正系数的加、减速衰减修正因子。通过调节 C_1, C_2 使加权校正系数对图像轴向强度衰减达到最佳的修正效果。参考相关论文对锥束 CT 的模拟实验的最佳修正结果,在成像实验中 C_1, C_2 分别取值 1.3 和 1.0 来进行数字合

成 X 线体层重建实验^[13]。

将反余弦加权系数代入到 FDK 重建公式中,则沿 X 线光轴给定深度 y_0 的冠断面图像 $f(x, y_0, z)$ 被修正为

$$f(x, y, z) = \int_{-\beta_0/2}^{\beta_0/2} \frac{W(x, y_0, z) D^2}{(D-s)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{D}{\sqrt{D^2 + u^2 + v^2}} \times P(u, v, \beta) \cdot H\left(\frac{Dt}{D-s} - u\right) dud\beta. \quad (3)$$

利用修正后的 FDK 重建算法进行 DTS 图像的重建,可以消除轴向强度衰减的影响。

3 轴向强度衰减校正方法的验证

3.1 Shepp-Logan 仿体模拟验证

同 2.1 节实验条件,模拟实验采用 Shepp-Logan 仿体为目标成像物体,并利用 FDK 算法及反余弦加权校正方法进行重建。图 4(a)~(f) 分别给

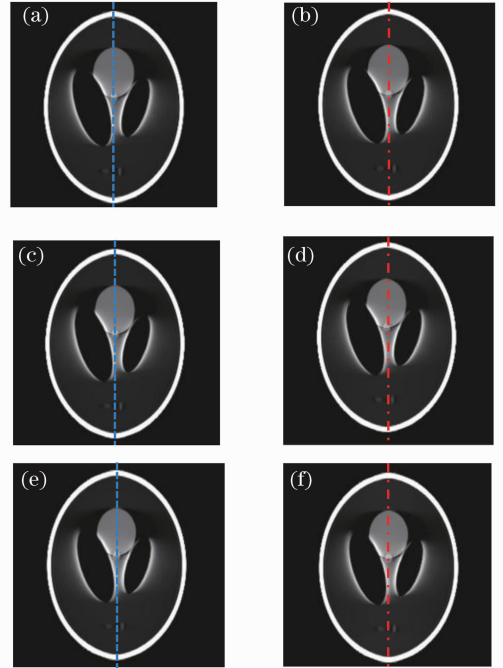


图 4 Shepp-Logan 仿体未校正重建与校正重建冠状面图像对比。(a) 10°锥角未校正;(b) 10°锥角校正;(c) 20°锥角未校正;(d) 20°锥角校正;(e) 30°锥角未校正;(f) 30°锥角校正

Fig. 4 Comparison of non-corrected and corrected reconstructed images of Shepp-Logan model. (a) Non-corrected image under 10°; (b) corrected image under 10°; (c) non-corrected image under 20°; (d) corrected image under 20°; (e) non-corrected image under 30°; (f) corrected image under 30°

出了 X 线源锥角为 10° , 20° 和 30° 下 Shepp-Logan 仿体的冠状面未校正图像及校正冠状面图像的对比。为了定量分析模拟结果,实验中利用未校正图像及校正重建的仿体冠状面轴向扫描线处的强度对比评价重建图像的轴向强度衰减补偿效果。同时

图 5 分别给出了 10° , 20° 和 30° 下未校正及校正的冠状面图像轴向扫描线处的强度对比。通过图 5 可知,本加权校正方法可在 X 线源锥角 10° , 20° 和 30° 下有效地降低 DTS 轴向强度衰减程度的现象。

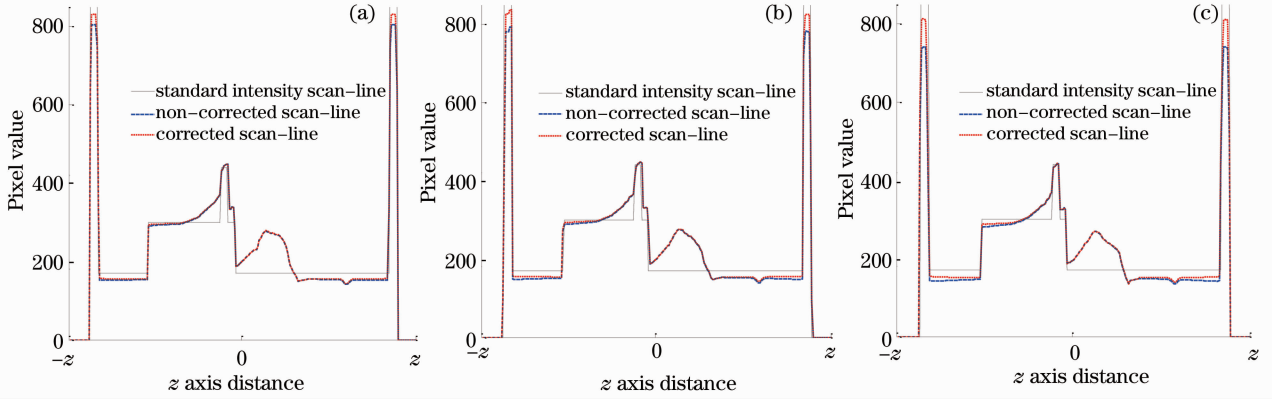


图 5 未校正与校正重建的 Shepp-Logan 仿体冠状面轴向扫描线处的强度对比。(a) 10° 锥角扫描线处的强度对比;
(b) 20° 锥角扫描线处的强度对比;(c) 30° 锥角扫描线处的强度对比

Fig. 5 Axial scan-line intensity comparison of non-corrected and corrected Shepp-Logan sagittal reconstructed images
(a) Axial scan-line intensity comparison under 10° ; (b) axial scan-line intensity comparison under 20° cone angle;
(c) axial scan-line intensity comparison under 30° cone angle

为了验证采用加权算法的抗噪性,对在 20° X 线源锥角下 Shepp-Logan 仿体的投影数据加入均值为 0 且方差分别为最大值的 0.1% 和 0.3% 的高斯白噪声进行实验模拟。图 6 分别给出了投影数据在引入两种不同大小的高斯白噪声情况下,未校正与校正重建的 Shepp-Logan 仿体冠状面轴向扫描线处的强度对比。

在模拟仿真实验中,可选用归一化均方误差 (NMSE) 来评价重建图像的质量,定义为

$$f_{\text{NMSE}} = \frac{\sum (x - \bar{x}_0)^2}{\sum \bar{x}_0^2}, \quad (4)$$

式中 x 表示重建像素的强度值, \bar{x}_0 表示仿体模型的标准强度值^[14]。因此, NMSE 可以用来评价校正算法在轴向上强度衰减的补偿效果。经过计算,在方差 0.1% 的噪声情况下,未校正与校正的重建图像的 NMSE 分别为 0.0809 和 0.0760。在方差 0.3% 的噪声情况下,未校正与校正的重建图像的 NMSE 分别为 0.0867 和 0.822。加噪模拟实验结

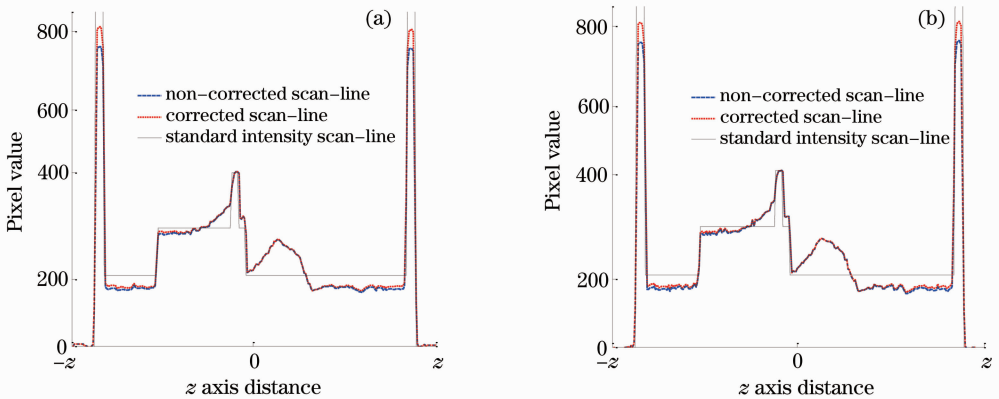


图 6 高斯白噪声情况下未校正与校正重建的 Shepp-Logan 仿体冠状面轴向扫描线处的强度对比。(a) 方差 0.1% 的噪声情况;(b) 方差 0.3% 的噪声情况

Fig. 6 Axial scan-line intensity comparison of non-corrected and corrected Shepp-Logan sagittal reconstructed images under Gauss white noise. (a) Gauss white noise with variance of 0.1%; (b) Gauss white noise with variance of 0.3%

果表明,轴向衰减补偿算法对图像噪声有一定的抑制作用。

3.2 仿体实验验证

利用微焦点 X 线源、计算机 X 线成像平板探测器以及精密旋转台搭建了一套 DTS 系统以验证校正方法对强度衰减的修正效果。高能微焦点 X 线源(L8121-01,滨松光电公司)的最小光斑焦点尺寸可达 $7\ \mu\text{m}$,锥束角度可达 45° 。计算机 X 线成像系统(REGIUS-190,柯尼卡美能达公司)作为系统

的平板探测器,其探测器分辨率像素为 $43.75\ \mu\text{m}$ 或 $87.5\ \mu\text{m}$ 。精密旋转台(UTR-80, Newport 公司)可提供的旋转精度为 0.017° ,确保了成像物体扫描位置的可重复性。

在搭建 DTS 系统时,所有部件被放置在定制的水平光学轨道上,源到旋转中心距离以及源到探测器距离根据实验要求可调,并严格调整 X 线源中心、精度转台中心和探测器中心对齐,图 7 给出了系统示意图。

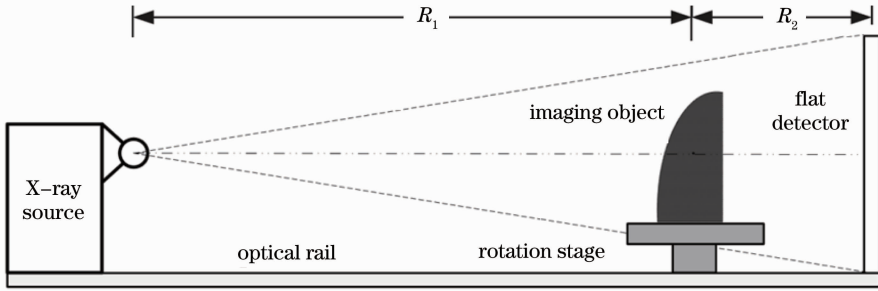


图 7 DTS 系统示意图

Fig. 7 Schematic diagram of DTS system

采用 Gammex-169 仿体以模拟被压紧的成人女性乳房,其内部组织细节设计适用于各种 X 射线医学成像实验。

实验中,X 线源与平板探测器的位置固定不动,而成像物体被置于精度旋转台上旋转。考虑到在尽量减少 X 射线曝光剂量的同时又不降低系统成像

质量,成像扫描中旋转台在 40° 扫描角度范围内以 2° 角度间隔旋转,获得 21 幅物体投影图像。为了提高图像的信噪比,物体投影图像被压缩成像素合并模式,合并后的投影图像像素大小为 $0.175\ \text{mm}$ 。具体实验参数如表 1 所示。

图 8 和图 9 分别是 X 线源锥角为 12° 和 18° 时

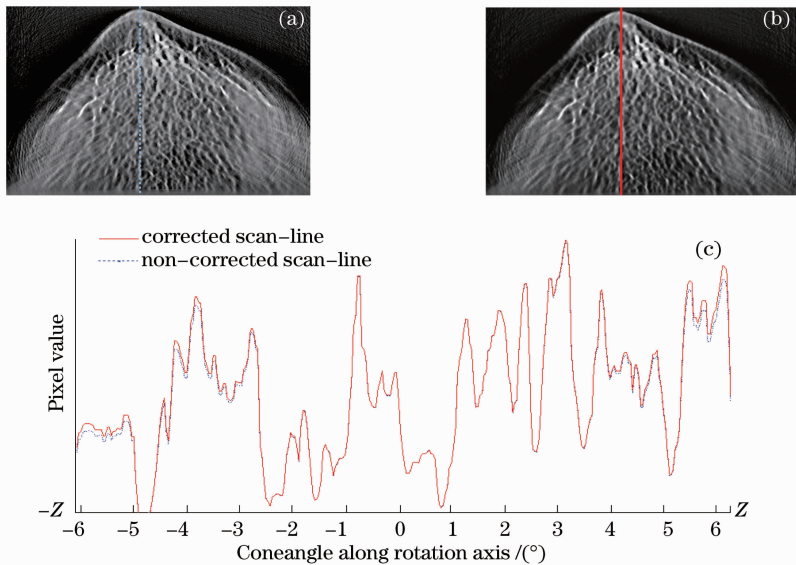


图 8 X 线源锥角为 12° 时乳房仿体的重建图像对比。(a)采用未校正算法的重建图像;(b)采用校正算法的重建图像;(c)未校正图像与校正图像沿轴向扫描线强度对比

Fig. 8 Reconstructed image comparison of the breast phantom with and without the intensity correction under cone angle of 12° . (a) Non-corrected reconstructed image; (b) corrected reconstructed image; (c) axial scan-line intensity comparison of the non-corrected and corrected reconstructed images

表 1 乳房仿体校正的实验参数

Table 1 Experiment parameters of the correction experiment based for the anthropomorphic breast phantom

	Source-to-isocenter distance /mm	Source-to-detector distance /mm	ROI on detector size /mm	X-ray cone angle /($^{\circ}$)	V /kV _p	A /mA
1	630	800	245×175	≈12	40	0.2
2	440	560	245×175	≈18	40	0.2

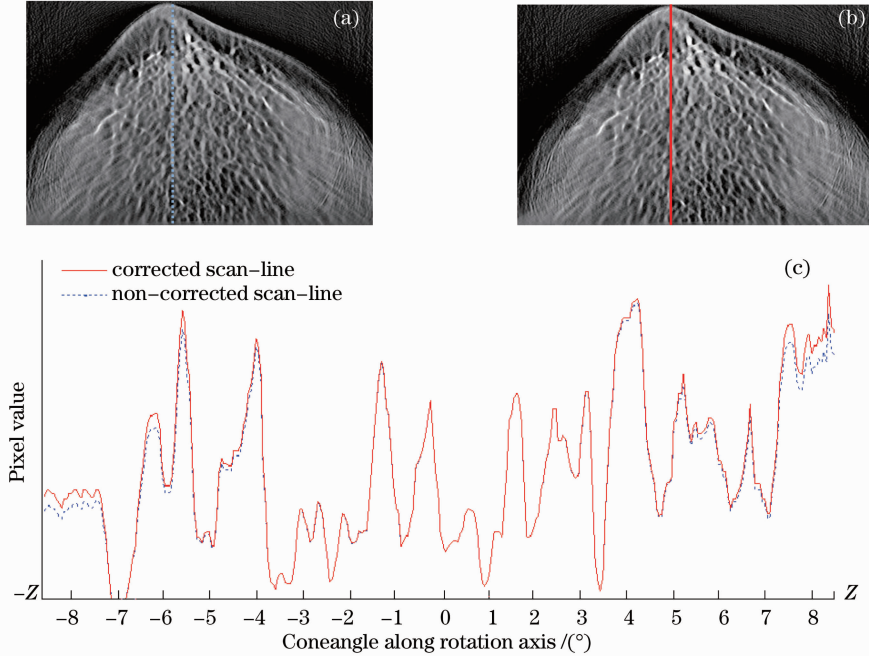


图 9 X 线源锥角为 18° 时乳房仿体的重建图像对比。(a) 采用未校正算法的重建图像；(b) 采用校正算法的重建图像；(c) 未校正图像与校正图像沿轴向扫描线强度对比

Fig. 9 Reconstructed image comparison of the breast phantom with and without the intensity correction under cone angle of 18°. (a) Non-corrected reconstructed image; (b) corrected reconstructed image; (c) axial scan-line intensity comparison of the non-corrected and corrected reconstructed images

采用未校正 FDK 重建和反余弦加权校正 FDK 重建的仿体图像。

图 8 和图 9 中的图像表明,校正之后的图像在轴向上的强度衰减减少,图像更加清晰。对比图 8(c)和图 9(c)可知,当 X 线源的锥角大时,校正效果更明显。由于所用的仿体是仿乳房组织的低对比度物体,因此实验结果预示着该方法在乳腺 DTS 中的应用前景。

4 结 论

由于 DTS 投影数据集的不完整性,利用滤波反投影算法重建出的 DTS 图像其强度在旋转轴方向上存在着类似帽状衰减现象。为了研究 X 线源锥角对 DTS 重建图像轴向强度衰减的影响,分别在 10°, 20° 和 30° 锥束角度下模拟重建出密度均匀球体的 DTS 的冠状面图像。为了研究此方法的修正效果,选取了 Shepp-Logan 仿体进行模拟仿真实验分

别对有无噪声的模拟投影数据进行定量的对比分析。结果表明,当 X 线源锥角大于 10° 时,加权修正算法对 DTS 图像的轴向强度衰减逐渐明显,且对图像噪声有一定的抑制作用。

在 FDK 算法中引入反余弦加权校正系数,以补偿 DTS 重建图像轴向强度衰减。模拟数据验证可知,该校正方法在不同的 X 线源锥角下均能有效地降低 DTS 重建图像中的轴向强度衰减程度。利用所搭建的 DTS 系统分别在 X 线源锥角 12° 和 18° 下对人体乳房仿体进行实验,重建结果表明,本文引入的校正方法能够补偿不同 X 线源锥角下 DTS 重建图像中的轴向强度的衰减。

致谢 感谢美国俄克拉荷马大学的刘泓老师对本研究的指导,感谢俄克拉荷马大学查尔斯与简·斯密斯捐赠基金的大力支持以及中国留学基金委员会的经济资助。

参 考 文 献

- 1 L. T. Niklason, B. T. Christian, L. E. Niklason *et al.*. Digital tomosynthesis in breast imaging [J]. *Radiology*, 1997, **205**(2): 399~406
- 2 J. T. Dobbins III, D. J. Godfrey. Digital X-ray tomosynthesis; current state of the art clinical potential [J]. *Phys. Med. Biol.*, 2003, **48**(19): 65~106
- 3 J. T. Dobbins III. Tomosynthesis imaging: at a translational crossroads [J]. *Med. Phys.*, 2009, **36**(6): 1956~1967
- 4 Lifeng Yu, Xiaochuan Pan. A new approach to image reconstruction in cone-beam CT with a circular orbit [C]. Proc. of the VIIth International Conference on Fully 3D Reconstruction in Radiology and Nuclear Medicine, Saint Malo, France, 2003
- 5 M. Grass, T. Kohler, R. Proksa. 3D cone-beam CT reconstruction for circular trajectories [J]. *Phys. Med. Biol.*, 2000, **45**(2): 329~347
- 6 Yang Min, Liu Jinghua, Li Baolei *et al.*. Measurement method of X-ray focus projection coordinates of three-dimensional micro-computerized 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
- 7 Zhang Jian, Chen Zhiqiang. Review of recent development in FDK reconstruction algorithms for 3D cone-beam CT [J]. *Chinese J. Stereology and Image Analysis*, 2005, **10**(2): 116~121
张 剑, 陈志强. 三维锥形束 CT 成像 FDK 重建算法发展综述 [J]. *中国体视学与图像分析*, 2005, **10**(2): 116~121
- 8 Wang Ben, Wang Ge. Image reconstruction algorithms for cone-beam CT [J]. *Computerized Tomography Theory and Applications*, 2001, **10**(2): 1~8
王 本, 王 革. 锥束 CT 重建算法 [J]. *CT 理论与应用研究*, 2001, **10**(2): 1~8
- 9 D. J. Godfrey, F. F. Yin, M. Oldham. Digital tomosynthesis with an on-board kilovoltage imaging device [J]. *Int. J. Radiation Oncology Biol. Phys.*, 2006, **65**(1): 8~15
- 10 K. Wiesent, K. Barth, N. Navab. Enhanced 3D-reconstruction algorithm for C-arm systems suitable for intrventional procedures [J]. *IEEE Trans. Med. Imaging*, 2000, **19**(5): 391~403
- 11 Lei Zhu, Jared Starman, Rebecca Fahrig. An efficient estimation method for reducing the axial intensity drop in circular cone-beam CT [J]. *International J. Biomedical Imaging*, 2008, **2008**: 242841
- 12 Z. K. Chen, R. L. Ning. Volume fusion for two-circular-orbits cone-beam tomography [J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(23): 5960~5966
- 13 Z. K. Chen, V. D. Calhoun, S. J. Chang. Compensating the intensity fall-off effect in cone-beam tomography by an empirical weight formula [J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(32): 6033~6039
- 14 Lu Xiaoqiang, Sun Yi. Limited angle computed tomography reconstruction algorithm based on multiplicative regularization method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1285~1290
卢孝强, 孙 怡. 基于乘性正则化的有限角度 CT 重建算法 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(5): 1285~1290

栏目编辑：李文喆