

文章编号: 1004-4140 (2009) 01-0016-07

基于平板探测器的锥束 CT 散射校正方法

胡栋材¹, 陈浩¹, 张定华²

1. 中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900
2. 西北工业大学 现代设计与集成制造技术教育部重点实验室, 西安 710072

摘要: 针对基于平板探测器的锥束 CT 系统固然存在的散射伪影, 提出在 X 射线源和被检测物体之间添加一个射束衰减网格装置的散射校正方法。本文首先介绍了射束衰减网格的实验装置, 然后推导了基于射束衰减网格的锥束 CT 散射校正方法, 最后通过圆柱样品实验验证了算法的可行性。实验结果表明, 研究提出的散射校正方法能有效减少基于平板探测器的锥束 CT 系统散射伪影, 提高了重建切片图像的质量。

关键字: 锥束 CT; 散射校正; 康普顿散射; 射束衰减网格

中图分类号: TP 391.41 **文献标识码:** A

基于平板探测器的锥束 CT 系统中, 散射是影响重建切片图像质量的一个重要因素, 散射减少了重建切片图像的对比度, 导致图像的杯状伪影, 使图像细节变得模糊, 这对小缺陷的检测是非常不利的^[1]。探索优化散射控制和减少散射技术是锥束 CT 系统的一个较大的挑战, 目前在该领域还没有一种较好的散射校正方法。

基于平板探测器的锥束 CT 散射校正技术一直是锥束 CT 系统研究的重点, John M. Boone 曾将减少散射技术的文献归结为两种不同的类型^[2], 一类为散射抑制的硬件处理方法, 包括空气隙法^[3]、准直器法^[4]、滤波板法^[4]及滤线栅技术^[5]等。这类方法只能在某种程度上抑制散射伪影, 无法达到较理想的效果。另一类为数字图像处理方法, 包括高通滤波法^[6]、散射反卷积法^[7]和 OSC (Ordered Subsets Convex) 迭代法^[8]等。这类方法需要估计散射的分布规律, 由于散射分布是一个不确定的随机过程, 目前国内外还无法对散射分布给出详尽的阐述和理论推导的统一公式。近年来, 随着三维 CT 技术的成熟, 涌现出一种基于 Beam Stop Array (BSA) 的散射校正方法^[9-10], 该方法要求 BSA 中铅球尺寸在保证完全挡住 X 射线光子透过铅球的同时使得铅球的投影越小越好。该方法对医学低能 CT 系统的检测有较好的效果, 但对于工业高能锥束 CT 系统的检测, 实验中铅球尺寸往往难以保证。

本文在 X 射线源和被检测物体之间添加一个射束衰减网格实验装置, 提出了相应的散射校正算法, 克服了基于 BSA 散射校正方法, 对工业锥束 CT 检测中铅球尺寸要求的局限性, 通过实验验证了该算法的可行性。

1 散射形成原因及影响

X 射线散射主要起源于射线与被检测物体相互作用的康普顿效应。康普顿效应产生的散射光子透过被检测物体后连同有用信息一起进入探测器探头, 形成散射伪影。由于康普顿

收稿日期: 2008-09-06。

基金项目: 航空科学基金资助项目 (2006ZD53047)。

散射效应，部分散射光子使被探测到的信号偏离了 X 射线强度的真实测量结果，导致重建图像中 CT 数的偏移，产生杯状伪影。以图 1 (a) 显示的康普顿散射发生过程为例，一个高衰减结构（深色椭圆形表示）位于被检测物体（浅色不规则形状表示）内部。对高衰减结构的位置，被探测到的光子数量将显著减少。由于散射光子偏转角度是随机的，探测器接收到的散射光子分布是低频背景信号，如图 1 (b) 中的虚线所示；散射光子与初始光子组合在一起，复合信号是对比度减小的投影，如图 1 (b) 中的点线所示。由于散射的低频特性，它几乎不包含关于原始物体的信息，另一方面，它确实对投影图像的噪声有贡献。因此，康普顿散射效应减少了图像的对比度和信噪比。

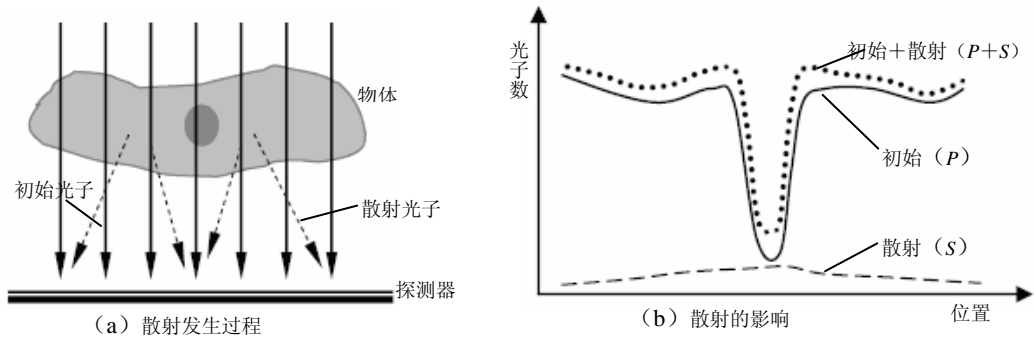


图 1 康普顿散射效应示意图
Fig.1 The figure of the Compton scatter

2 实验装置和校正方法

2.1 校正实验装置

本文提出的散射校正方法，需在 X 射线源和被检测物体之间添加一个射束衰减网格实验装置，如图 2 (a) 所示。射束衰减网格由低吸收系数的有机玻璃板填上均匀分布的钢珠小球阵列组成，如图 2 (b) 所示，小球直径为 3mm，相邻的两个小球中心间隔为 5mm。射束衰减网格要求射线完全穿透钢珠小球和被检测物体的同时，钢珠小球的投影区域越小越好。

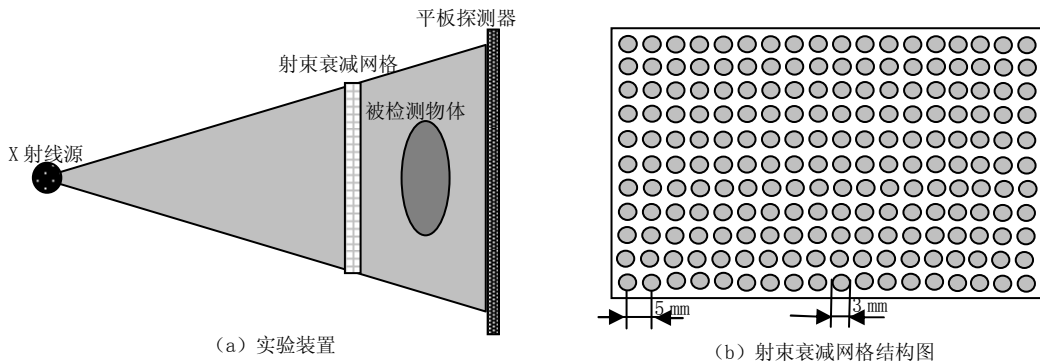


图 2 射束衰减网格实验装置图
Fig.2 Tthe figure of the beam attenuation grid

2.2 散射校正算法原理

定义相同扫描条件（主要是扫描电压和电流）下的两种扫描。扫描 1：仅被检测物体的扫描，如图 3（a）所示，设由 X 射线源发出的总光子数为 I_0 ，透过被检测物体后的散射光子数为 S ，透射光子数为 I_3 ，探测器接收到的光子数为 C_1 （ $C_1 = I_3 + S$ ）。扫描 2：带射束衰减网格被检测物体的扫描，如图 3（b）所示，由于扫描条件不变，X 射线源发出的总光子数仍然为 I_0 ，透过小球后的透射光子数为 I_1 ，透过小球并透过物体的透射光子数为 I_2 ，透过被检测物体后的散射光子数近似为 S ，探测器接收到的光子数为 C_2 （ $C_2 = I_2 + S$ ）。

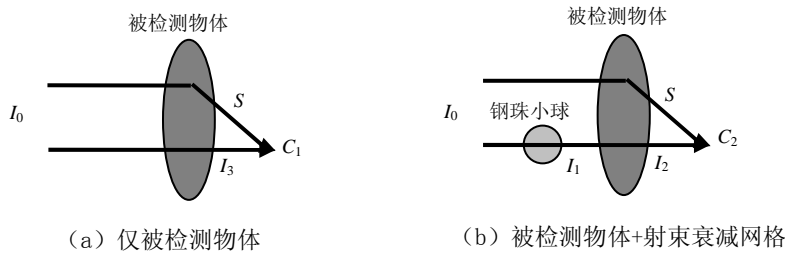


图 3 散射校正算法示意图

Fig.3 The figure of the algorithm of the scatter correcting

对仅被检测物体的扫描（如图 3（a）），根据 Beer 定理^[11]，以被检测物体为研究对象，有：

$$I_3 = C_1 - S = I_0 e^{-\mu_2 l} \quad (1)$$

对被检测物体+射束衰减网格的扫描（如图 3（b）），以钢珠小球为研究对象，有：

$$I_1 = I_0 e^{-\mu_1 d} \quad (2)$$

以被检测物体为研究对象，有：

$$I_2 = C_2 - S = I_1 e^{-\mu_2 l} = I_0 e^{-(\mu_1 d + \mu_2 l)} \quad (3)$$

其中， d 为小球直径， l 为被检测物体厚度， μ_1 为小球线性衰减系数， μ_2 为被检测物体线性衰减系数。

式（3）除以式（1），得：

$$\frac{I_1}{I_0} = \frac{C_2 - S}{C_1 - S} \quad (4)$$

将（4）式代入（2）式，有：

$$I_1 = I_0 e^{-\mu_1 d} = I_0 \frac{C_2 - S}{C_1 - S} \quad (5)$$

则，

$$S = \frac{C_2 - C_1 e^{-\mu_1 d}}{1 - e^{-\mu_1 d}} \quad (6)$$

引入系数 $k = C_2/C_1$ ，散射值 S 可计算为：

$$S = C_1 \frac{k - e^{-u_1 d}}{1 - e^{-u_1 d}} \quad (7)$$

则，可定义透散比 r_s 为：

$$r_s = \frac{k - e^{-u_1 d}}{1 - e^{-u_1 d}} \quad (8)$$

以上这些运算基于探测器接收到的光子数，而滤波反投影重建算法（FDK 算法）首先需要对投影图像进行对数运算，对校正后的投影图像进行对数运算后的函数值为：

$$V = \lg \frac{I_0}{I} = \lg \frac{I_0}{C - S} = \lg \frac{I_0}{C(1 - r_s)} = \lg \frac{I_0}{C} + \lg \frac{1}{1 - r_s} \quad (9)$$

式中， I_0 为投影图像背景值， C 为探测器接收到的光子数， $\lg \frac{I_0}{C}$ 为被检测物体投影图像对数运算后的图像值， $\lg \frac{1}{1 - r_s}$ 为透散比相关变换对数运算后的图像值。

由式（9）可以看出，被检测物体散射校正后的投影图像对数运算后的图像值，可由被检测物体的原始投影图像对数运算后的图像值和透散比图像相关变换对数运算后的图像值叠加而得。由于，滤波反投影重建算法（FDK 算法）具有良好的线性叠加能力，因此可以对原始投影图像对数运算后的图像和透散比图像相关变换对数运算后的图像分别进行滤波反投影重建，然后对这两部分重建图像进行叠加，得到散射校正后的重建切片图像。

2.3 散射校正方法的实现

本文提出的锥束 CT 系统散射校正方法方案如图 4 所示，主要的实验步骤如下：

- 1) 校正探测器输出图像，初始化 X 射线源，采集一幅空气投影图像 I；
- 2) 将射束衰减网格置于 X 射线源和被检测物体之间，采集一幅射束衰减网格投影图像 II；
- 3) 将被检测物体置于旋转工作台上，圆周扫描采集被检测物体+射束衰减网格的投影图像集 III；
- 4) 移走射束衰减网格，圆周扫描采集仅被检测物体的投影图像集 IV。

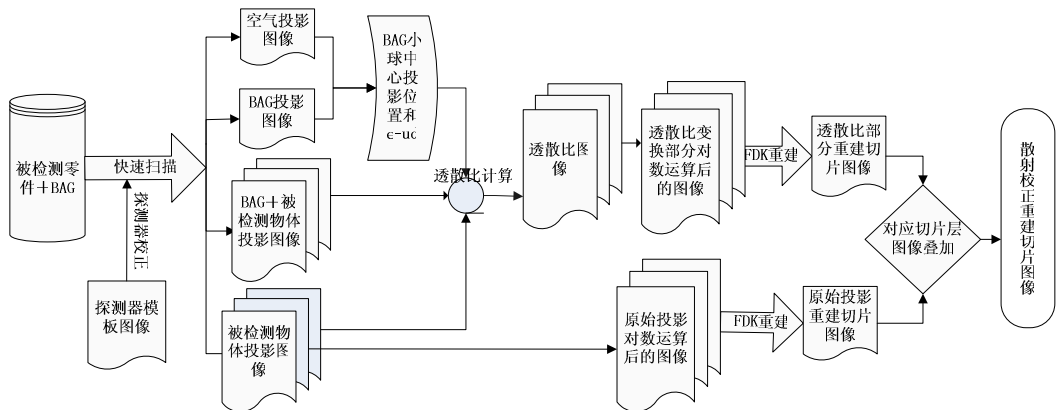


图 4 散射校正方法原理图

Fig.4 The scheme of the scatter correcting

由射束衰减网格投影图像 II 计算钢珠小球中心的投影位置, 本文通过图像二值化、轮廓跟踪和圆拟合, 计算出钢珠小球的近似圆形区域的圆心和直径, 以圆心为中心、直径为边长的正方形区域内搜索投影值最小的位置作为钢珠小球中心的投影位置, 并通过仿真实验验证了算法的准确性。由空气投影图像 I 和射束衰减网格投影图像 II 根据式 (2) 可计算小球中心的透射系数 $e^{-\mu d}$ 。由射束衰减网格 + 被检测物体的投影图像集 III 和被检测物体的投影图像集 IV, 结合小球中心投影位置和小球中心的透射系数, 由 2.2 节提到的计算方法, 可计算每个钢珠小球中心投影位置上的透散比 r_s , 通过双 3 次样条插值得到透散比分布图像。根据式 (9) 分别计算原始投影图像和透散比相关变换对数运算后的图像, 分别对两种类型的图像采用滤波反投影重建算法重建出重建切片图像, 叠加相同切片层上的这两部分重建切片得到散射校正后的重建切片图像。

3 应用实例

3.1 实验环境和检测样品模型

为验证本文提出的算法的可行性, 采用一个圆柱样品模型 (底面直径为 40 mm, 高度为 80 mm 的铅柱) 进行了实验。锥束 CT 系统由 X 射线源, 平板探测器, 旋转工作台和计算机控制系统组成。X 射线源采用德国 YXLon Y.TU 450-D02, 最大扫描电压为 450 kV, 焦点尺寸为 2.5 mm/5.5 mm。平板探测器采用美国 Varian PaxScan 2520, 平板探测器的有效区域为 17.9 cm × 23.8 cm, 像素点距为 127 μm 。其他重要的扫描参数和重建参数如表 1 所示。

表 1 扫描参数和重建参数
Table 1 The parameters of the scan and reconstruction

实验环境指标	实验参数值
扫描电压	280 kV
扫描电流	0.25 mA
采集频率	3 帧/s
圆周扫描采集投影图像幅数	360
投影图像大小	1 536 × 1 920
重建切片图像大小	1 024 × 1 024
射线源与探测器间的距离	1 144.64 mm
射线源与被检测物体间的距离	946.69 mm
射线源与射束衰减网格间的距离	846.69 mm
放大系数	1.21

3.2 实验结果及分析

以圆柱样品模型为例, 实验环境如图 5 所示, 该图显示了圆柱样品模型通过本文提出的散射校正算法校正后的实验结果。图 5 (a) 为圆柱样品模型原始投影图像第 550 层 (约为圆柱高度中间位置) 的重建切片图像, 图 5 (b) 为透散比图像相关变换第 550 层的重建切片图像, 图 5 (c) 为基于射束衰减网格散射校正算法校正后第 550 层的重建切片图像, 图 5 (d) 显示了线性灰度分布的采样位置, 图 5 (e) 为圆柱样品模型原始投影图像的重建切片图像、透散比图像相关变换后的重建切片图像和基于射束衰减网格散射校正后的重建切片图像在图 5 (d) 显示的相同采样位置上的线性灰度分布情况。

从图 5 圆柱样品模型的实验结果可以看出, 散射校正方法能有效减少锥束 CT 系统的散射伪影。图 5 (a) 和图 5 (c) 的实验结果直观地给出了校正效果, 从图 5 (e) 的线性灰度分布图像上可以看出, 基于射束衰减网格的散射校正算法提高了重建图像的对比度, 减少了图像的杯状伪影。图 5 (e) 中校正后的图像并不能完全消除杯状伪影, 这是因为杯状伪影还与射束硬化现象有关。此外, 图 5 (b) 中的重建切片图像质量与透散比图像的拟合方

法有关，有待后续进一步的改进。

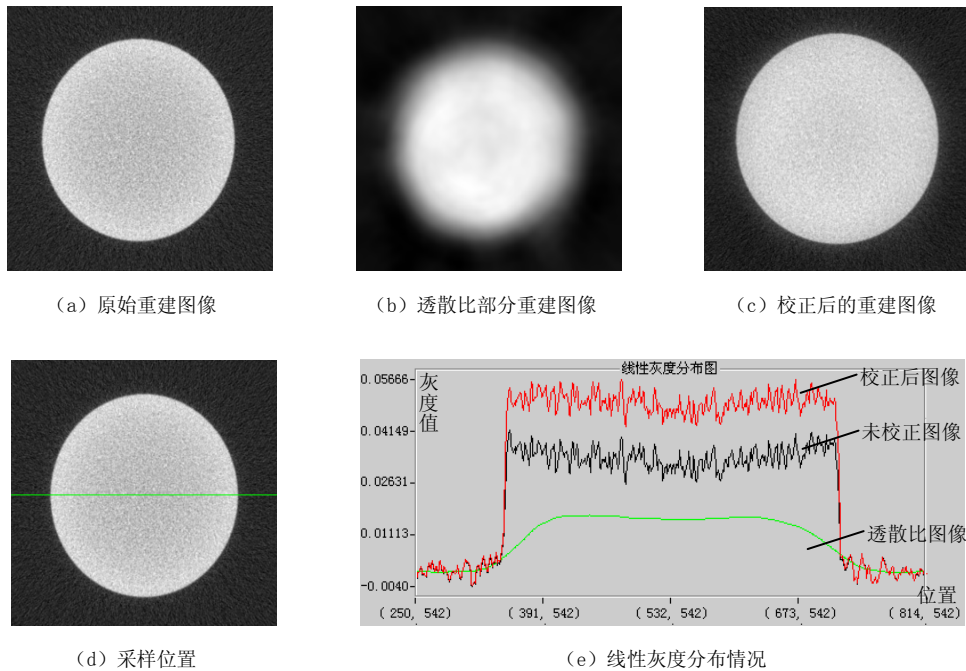


图 5 圆柱样品模型实验结果

Fig.5 The result of the cylinder model

4 结论

本文提出了基于射束衰减网格的散射校正算法，克服了基于 Beam Stop Array 的散射校正算法应用于工业中高能锥束 CT 检测过程中铅球尺寸要求的局限性，通过圆柱样品模型验证了该算法的可行性。实验结果表明，本文提出的散射校正算法能明显减少锥束 CT 系统重建切片图像的杯状伪影，提高重建切片图像的对比度，改善重建图像的质量，是基于平板探测器的锥束 CT 系统的一种简单、实用的散射校正方法。

参考文献

- [1] Halmshaw R. Industrial radiology-theory and practice[M]. London: Capman & Hall, 1995, 134-135.
- [2] John M B. Scatter correction algorithm for digitally acquired radiographs: Theory and result[J]. Med Phys, 1986, 13(3): 319-328.
- [3] 李永利, 桂志国, 杨民, 等. X 射线检测中散射模型的理论分析[J]. 华北工学院测试技术学报, 2000, 14(1): 12-17.
LI Y L, GUI Z G, YANG M, et al. Theoretical Analysis of Scatter Models in X-ray Detectin[J]. Journal of Test and Measurement Technology Of NCIT, 2000, 14(1): 12-17.
- [4] Hsieh J. 计算机断层成像技术原理、设计、伪影和进展[M]. 张朝宗, 郭志平, 王贤刚, 等译. 北京: 科学出版社, 2006.
Hsieh J. Computed tomography: principles, design, artifacts, and new developments[M]. SPIE

- Press, 2002.
- [5] 李永利. X 射线成像中散射的减小与消除[D]. 太原: 华北工学院, 2000.
Li Y L. The scatter reduction for the X-ray tomography[D]. Taiyuan: Technology of NCIT, 2000.
- [6] Karin K. Two new experimental methods of calculating scatter fraction as a function of depth in scattering media: a comparison study[J]. Med phys, 1992, 19(3): 591-598.
- [7] Fredrick C W, ALBERT M, DWIGHT G N. A characterization of the scatter point-spread function in terms of air gaps[J]. IEEE Trans, 1988, 7(4): 168-175.
- [8] 孙少华, 高文焕, 张丽, 等. 工业 CT 散射校正方法的研究[J]. 核电子学与探测技术, 2002, 22(5): 426-428.
Sun S H, Gao W H, Zhang L, et al. Research of scatter correction on industry computed tomography[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2002, 22(5): 426-428.
- [9] Ning R L, Tang X Y, Conover D L. X-Ray scatter suppression algorithm for cone beam volume CT[J]. Proc SPIE, 2002, 4682: 1605-7422, .
- [10] Cai W X, Ning R L, Conover D. Scatter correction using beam stop array algorithm for cone-beam CT breast imaging[J]. Proc SPIE, 6142: 61423E-1.
- [11] 庄天戈. CT 原理与算法[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1992.
Zhang T G. The principle and method for CT[M]. Shanghai: Press of Shanghai Jiaotong University, 1992.

Scatter Correction Method for Flat-Panel Detector-Based Cone Beam CT

HU Dong-cai¹, CHEN Hao¹, ZHANG Ding-hua²

1. Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China

2. Key Laboratory of Contemporary Design and Integrated Manufacturing Technology, Ministry of Education, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China

Abstract: Aiming to the scatter artifacts for the flat-panel detector-based cone beam CT, a scatter correction method which need adding a Beam Attenuation Grid between the X-Ray source and the tested object was proposed. This study firstly described the device of the Beam Attenuation Grid, then educed the scatter correction algorithm based on the Beam Attenuation Grid. In order to improve the feasibility of this method, the cylinder phantom was experimented. The result showed that the method can effectively reduce the scatter artifacts and increase the quality of the reconstructed slice image.

Key words: cone beam CT; scatter correction; Compton scatter; beam attenuation grid

作者简介: 胡栋材 (1981—), 男, 硕士, 主要从事锥束 CT、计算机图形图像处理研究。

Tel: 15881649486, E-mail: dongcai@163.com