

# 基于材料衰减特性的 CT 硬化校正算法

惠 苗<sup>1</sup>, 向可斌<sup>2</sup>

(1. 三明学院 数学与计算机科学系, 三明 365004; 2. 73892 部队, 永安 366000)

**摘 要:**针对工业 CT 数据获取过程中 X 射线的多能导致的重建图像产生伪影和降质的问题, 从射线硬化的物理性质出发, 将多色投影数据通过矩阵运算转化为单色投影数据。利用数字图像趋势项产生及消除的基本原理, 结合小波滤波方法, 提出了一种不需要提前 CT 扫描和设计的综合校正方法。该方法简单、快速, 是通用的多色投影校正方法, 并且它不受扫描物体组成和扫描条件的限制。通过对受硬化影响的实际图像进行硬化校正, 表明该方法不需要先验知识且校正效果良好, 具有通用性。

**关键词:**CT 检测; 射束硬化; 多色投影; 小波变换; 图像质量

中图分类号: TG115. 28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2009)07-0557-03

## Beam Hardening Correction Algorithm Based on Material Attenuation in Computed Tomography

HUI Miao<sup>1</sup>, XIANG Ke-Bin<sup>2</sup>

(1. Sanming University Mathematics and Computer Department, Sanming 365004, China;

2. 73892 Aring, Yong'an 366000, China)

**Abstract:** Aiming at the artifact and image degradation of reconstructed image produced by the polychromatic spectrum of X-ray in the CT projection, a new correction method was put forward. The correction algorithm using physical property was deduced and the polychromatic projection was transformed to a monochromatic projection by matrix operation. Based on the producing and removing of the image trend, an integrative correction method combining with wavelet filtering and correction factor was presented, which need not CT scanning and design in advance, which was simple, fast, universal, and independent of the constitute of workpiece and scanning condition. The hardening correction method was used in practical reconstructive images influenced by hardening, and the results showed that the better effect could be obtained, without prior knowledge and the method was of universality.

**Keywords:** Computed tomography testing; Beam hardening; Polychromatic projection; Wavelet transform; Image quality

射束硬化校正一直是人们研究的重要问题。在重建图像中, 射束硬化导致密度均匀的切片在重构图像上表现为亮度不均, 图像上的像素值分布呈“茶杯”状, 降低了图像质量。衰减率大的金属材料零件射束硬化现象比较严重, 这将严重影响工业 CT 的检测效果, 必须加以校正。硬化校正的实质就是尽

可能地将多能谱射线校正为单能谱射线(即单色射线)。常见的校正方法有光谱制约法、多项式修正法、迭代修正法<sup>[1-2]</sup>以及双能法<sup>[3]</sup>等。另外, 在射线源与被检物之间放置滤波片也可以有效地抑制硬化, 但它使得射线在穿透物体之前能量损失较大, 影响射线的穿透能力。

### 1 基于材料衰减特性的校正方法

基于三种材料衰减物理特性的校正方法, 其校正公式是由两个数学定理推导出来的。该方法下射束硬化伪影能很好地被消减。该方法不需要一个提

收稿日期: 2008-09-23

**基金项目:**三明学院科学研究发展基金资助项目(B0827/Q); 三明学院重点学科建设基金资助项目(JDZDXK0604)

**作者简介:**惠 苗(1980—), 女, 硕士, 从事计算机通信、信息处理与重建、无损检测和计算机科学与技术方面的教学方面的研究。

前的 CT 扫描和设计一个校正模型,且扫描物体的组成和扫描条件不会限制它的有效性。

### 1.1 硬化的三种物理特性

(1) 当硬化发生时,通过探测器探测到的多色投影数据比单色投影数据更大。该特性可以用以下不等式表示:

$$I_2(i, j) > I_1(i, j)$$

$$\frac{I_0(i)}{I_2(i, j)} < \frac{I_0(i)}{I_1(i, j)}$$

式中  $I_1(i, j)$ ——在第  $i$  个扫描角,第  $j$  个探测器上得到的单色投影数据;

$I_2(i, j)$ ——在第  $i$  个扫描角,第  $j$  个探测器上得到的多色投影数据;

$I_0(i)$ ——在第  $i$  个扫描角下,参考探测器上的值。

(2) 当硬化发生时,X 射线穿过物体越长,硬化越严重。该特性可以用以下不等式表示:

$$\frac{I_0(i)}{I_{2l}(i, j)} < \frac{I_0(i)}{I_{1l}(i, j)}$$

$$\frac{I_0(i)}{I_{2s}(i, j)} < \frac{I_0(i)}{I_{1s}(i, j)}$$

$$\frac{I_{2l}(i, j)}{I_{1l}(i, j)} > \frac{I_{2s}(i, j)}{I_{1s}(i, j)}$$

式中  $I_{1s}(i, j)$ ——当射线穿过物体较短时,在第  $i$  个角度下,第  $j$  个探测器上的单色投影数据;

$I_{1l}(i, j)$ ——当射线穿过物体较长时,在第  $i$  个角度下,第  $j$  个探测器上的单色投影数据;

$I_{2s}(i, j)$ ——当射线穿过物体较短时,在第  $i$  个角度下,第  $j$  个探测器上的多色投影数据;

$I_{2l}(i, j)$ ——当射线穿过物体较长时,在第  $i$  个角度下,第  $j$  个探测器上的多色投影数据;

$I_0(i)$ ——在第  $i$  个角度下,在参考探测器上的参考值。

(3) 理想情况下,对于所有扫描角度,结构对称构件横截面的总衰减值是不变的。这个性质可以用以下不等式表示:

$$\sum_{j=1}^N I(1, j) = \sum_{j=1}^N I(2, j) = \sum_{j=1}^N I(3, j) = \dots = \sum_{j=1}^N I(M, j)$$

式中  $N$  为探测器的个数; $M$  为投影角的采样个数。

### 1.2 两个数学定理

(1) 如果  $A, B, C \in R^+$ , 且  $A > B > C > 1$ , 那么  $(A-C)/(B-C) > A/B$ 。

(2) 如果  $A, B, C, D \in R^+$ , 且  $A > B > C > 1, B < D$ , 那么  $(A-C)/(B-C)(A/B) > (A-C)/(D-C)(A/D)$ 。

### 1.3 分析

分析以上物理特性和数学定理,得出两个结论:

(1) 如果在定理(1)中的  $A$  和  $B$  分别是物理特性(1)中的  $I_0(i)$  和  $I_2(i, j)$ ,  $C$  是一个校正因子,那么在定理(1)中的数学关系能校正物理特性(1)的射束硬化。

(2) 如果在定理(2)中的  $A, B$  和  $D$  对应物理特性(2)中的  $I_0(i)$ ,  $I_{2l}(i, j)$  和  $I_{2s}(i, j)$ ,  $C$  是一个校正因子,那么在定理(2)中的数学关系能校正物理特性(2)的射束硬化。

由定理(1)和(2)中的校正原理,得到单色投影数据近似为多色投影数据减去一个校正值。由此提出校正方法如下:

$$I_c(i, j) = I_o(i, j) - K(i) \min_i [I_o(i, j)] \quad (1)$$

式中  $I_o(i, j)$ ,  $I_c(i, j)$ ——在第  $i$  个角度下,第  $j$  个探测上的多色投影数据和单色投影数据;

$K(i)$ ——在第  $i$  个扫描角下的校正因子;

$\min_i()$ ——取第  $i$  个扫描角下,探测器上的最小值。

校正因子  $K(i)$  由性质(3)得到,表达式如下:

$$K(i) = C \times \frac{S(i)}{\max[S(i)]} \quad S(i) = \sum_{j=1}^N I_o(i, j) \quad (2)$$

式中  $I_o(i, j)$ ——在第  $i$  角度下,第  $j$  个探测器上得到的多色投影数据;

$C$ ——从 0.5 到 0.8 之间的实验常数;

$\max()$ ——数列的最大值;

$N$ ——探测器的个数。

该方法的校正实现过程是:

(1) 由探测器得到原始的 X 射线衰减的投影值  $I_o(i, j)$ 。

(2) 在每一个扫描角度下,寻找投影值的最大值和最小值。

(3) 用式(2)计算校正因子  $K(i)$ 。

(4) 用式(1)校正原始的 X 射线衰减的投影值  $I_c(i, j)$ 。

校正过程及算法均与照射工件的结构和组成没有关系,因而具有一定的通用性。

另外,由于射束硬化造成的重建图像的伪像呈“茶杯”状,从图像处理的角度来说,即相当于重建图像具有一个“茶杯”的趋势项,要去除重建图像的此种伪像,实际上就是把重建图像通过低通滤波器,去除趋势项。为了在 CT 图像去除趋势项的同时能够滤除高频噪声,而且不影响重建图像的边缘效果,笔者选用了小波变换降噪法<sup>[4]</sup>对一维投影数据滤波,取得了较好的效果。

通过对投影数据进行一维低通滤波,然后对滤波后的数据进行 Radon 变换,可以等效得到射束硬化校正后的重建图像。

在实际校正过程中,可结合小波滤波和基于物理特性的校正方法相,其算法不仅与照射过程、照射工件组成及结构无关,而且与射线使用的能量无关。

## 2 试验分析

为了验证该算法在实际校正中的效果,利用试验方法获得多色 X 射线投影数据。使用的 CT 系统是 GE 公司 ISOVOLT-450KV

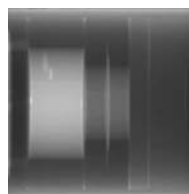


图 1 在 0°时得到的投影数据图

的 X 射线源和美国 VARIAN PaxScan2520 平板探测器,其探元大小是 0.127 mm。

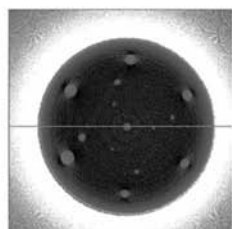
硬化模型的材料是铝质标准件,其半径是 80 mm。图 1 显示的是标准件在 0°时的投影数据。图 2 和 3 是标准件 460 列断层重建原图及校正后的图像。图像尺寸是 512×512 像素,像素大小近似为 0.127 mm。

试验结果证明了基于物理特性的校正方法和小波滤波相结合方法的有效性。与传统的校正方法相比,它有几个优点:

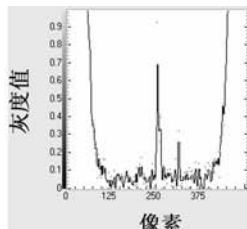
- (1) 简单 无需要预先扫描和数学模型构造校正模型。
- (2) 快速 校正仅涉及对投影数据的简单操作。
- (3) 通用性 对多种材料的物体都有效。

## 3 结论

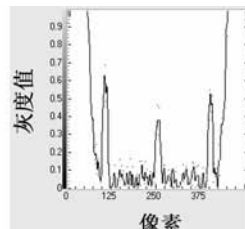
通过公式推导及实际校正结果表明,结合小波滤波和基于物理特性的校正方法效果良好,具有通用性。不仅能够实现射线硬化校正与照射过程、照射工件的材料及结构无关,而且能够在整个射线能量范围内实现校正方法的通用性,具有推广使用价值。



(a) 重建图像

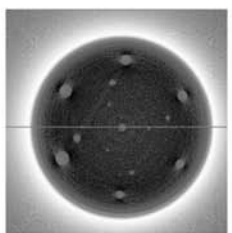


(b) 横线处灰度曲线

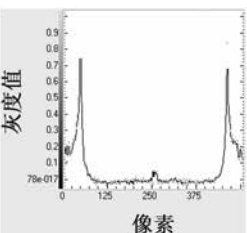


(c) 竖线处灰度曲线

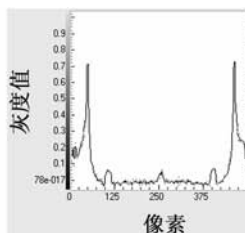
图 2 受射线束硬化影响的重建结果



(a) 重建图像



(b) 横线处灰度曲线



(c) 竖线处灰度曲线

图 3 硬化校正后的重建结果

## 参考文献:

- [1] 赫尔曼 GT. 由投影重建图像——CT 的理论基础[M]. 严洪范,译. 北京:科学出版社,1985.
- [2] 陆李. CT 技术在无损检测中的应用[D]. 上海:东南大学,1993:37—41.

- [3] Remeysen K, Swennen R. Beam hardening artifact reduction in microfocus computed tomography for improved quantitative coal characterization[J]. International Journal of Coal Geology, 2006, 67: 101—111.
- [4] 曾理,徐问之,陈廷槐. 多尺度小波分析用于工业 CT 投影数据的滤波[J]. 无损检测, 1998, 20(12): 331—333.