

文章编号: 0253-2239(2007)02-0302-5

一种简便的计算层析系统 X 射线硬化校正方法*

方 正 孙小敏 骆清铭

(华中科技大学生物医学光子学教育部重点实验室武汉光电国家实验室(筹)生物医学光子学研究部, 武汉 430074)

摘要: 以实物拍摄为依据,用一种最简便的修正方法解决计算机 X 射线层析术成像时由于硬化效应引起的切片图灰度失真问题。用高性能数字 X 射线机 FAXITRON MX-20(射线管焦点 $20\ \mu\text{m}$,探测板灰度等级 16 位)对不同厚度的物体进行透射成像,测得对应的透射光强度,并利用新创的指数拟合法得到理想的拟合曲线,由此推导硬化效应的指数校正公式;最后利用实验室的微型计算机层析设备进行扇形束扫描,并逆投影重建生成计算层析断层图像,验证了该校正方法的实用性。该指数拟合法的误差不到常用的二阶多项式拟合法的 $1/3$,对物体计算层析重构,硬化校正以前有明显的“杯状”伪迹,切片灰度不均匀,用指数法修正以后该伪迹消失,切片灰度均匀。

关键词: 医用光学与生物技术; 计算层析; 硬化效应; 曲线拟合; “杯状”伪迹; 滤波逆投影

中图分类号: TP391.41 文献标识码: A

New Simple Method of X-Ray Beam Hardening Correction for CT Reconstruction

Fang Zheng Sun Xiaoming Luo Qingming

(The Key Laboratory of Biomedical Photonics of Ministry, Education Division of Biomedical Photonics, Wuhan National Laboratory for Optoelectronics (Proposed), Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Abstract: Based on practical experiments, a new method to eliminate beam hardening effect causing cup-like artifacts in CT reconstruction, is demonstrated. The digital X-ray set FAXITRON MX-20 with a high resolution, of which the focal length of the X-ray tube is $20\ \mu\text{m}$, and the gray scale of the detecting board is 16 bit, is adopted to detect samples with different thickness. Intensities of the X-ray transmitting samples of different thickness are recorded. The exponential fitting method is used to fit the related curves, and by the fitting curves the exponential correction formula is derived. By taking photons of a cylindrical sample by the micro-CT system, we reconstruct a slice of the sample with the fan-beam filtered back-projection algorithm and validate the method. The error of the exponential fitting is less than $1/3$ of the results by the conventional two-order polynomial fitting. In the CT reconstruction, the clear cup-like artifact and gray scale ununiformity of the slice before hardening correction are eliminated by the exponential fitting.

Key words: medical optics and biotechnology; computed tomography; beam hardening effect; curve fitting; cup-like artifact; filtered back-projection

1 引 言

传统的计算机 X 射线层析术(Computed tomography, CT)图像重建算法都是基于 X 射线源为单能的假设,在单能 X 射线情况下射线束流强度随吸收物质厚度按自然指数形式衰减,而且衰减系数为常数^[1]。但是实际用于拍摄的 X 射线是由不同能量的光子组成的,由于能量低的光子比能量高

的光子在穿透物体时衰减得多,使透过物体的射线能谱发生了变化,这便是射线的硬化效应,影响重建图像的质量,使得均匀物体的断层图像的灰度并不均匀,其灰度沿半径方向不断改变,在边缘处明显偏亮,这就是“杯状”伪迹。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,目前最简单也是最常用的方法是多项式拟合的校正方法。理论上多项

* 国家自然科学基金(90508003)资助课题。

作者简介: 方正(1976—),男,湖北黄梅人,博士研究生,主要从事医学影像方面的研究。E-mail: fangzheng38@163.com

导师简介: 骆清铭(1966—),男,湖北蕲春人,教授,博士生导师,主要从事医学影像的研究。E-mail: qluo@mail.hust.edu.cn

收稿日期: 2006-10-18; 收到修改稿日期: 2006-11-01

式次数越高拟合曲线越逼近原始曲线,但是这种方法一般只能用到二次多项式拟合,因为更高次数的多项式拟合很难得到解析解,难以在程序中实现。为了解决该问题,本文提出了一种指数拟合法,可以达到更好的拟合效果,而且很容易编程实现。

2 原理分析

2.1 射束硬化

单能 X 穿过均匀物质的衰减公式为

$$I = I_0 \exp(-\mu x), \quad (1)$$

由(1)式得

$$\mu x = \ln(I_0/I), \quad (2)$$

式中 I_0 为贯穿物体前的主射线强度, I 为贯穿物体后的主射线强度, μ 为物质的线性衰减系数, x 为物质的厚度^[2]。这里称 $\ln(I_0/I)$ 为射束比对数。可以看出对于单色射线来说,贯穿厚度与射束比对数呈线性关系。对于多色射线来说,情况则复杂得多,出射光强不但与贯穿厚度有关,还与射线的能谱有关:

$$I = I_0 \int_E S(E) \exp[-m(E)x] dE, \quad (3)$$

式中 E 指射线的能量, $S(E)$ 为射线的能谱分布, $m(E)$ 为被测物质对应能谱的线性衰减系数。则多能射线的射束比对数 p 为

$$p = \ln(I_0/I) = x \cdot \int_E S(E) m(E) dE. \quad (4)$$

2.2 多项式拟合校正法

对实验所得的多色射束和数据进行拟合,得到多色射束比对数数据和贯穿厚度变化之间的关系,其公式可以通过多项式拟合得到:

$$p = a(n)x^n + a(n-1)x^{n-1} + \dots + a(1)x + a. \quad (5)$$

由于二次以上的多项式方程不易求解解析解, n 的取值一般选 2, 得到拟合曲线后, 过 $(0, P_0)$ 点作该曲线的切线^[3], 再平移到原点, 可得单能射束比对数曲线方程:

$$p_m = a(1)x. \quad (6)$$

具体操作就是, 首先将得到的投影数据 P 代入到(5)式中, 可以得到等效的物质厚度 x :

$$x = f^{-1}(p), \quad (7)$$

再将 x 代到单能投影数据曲线(6)式中, 就能得到单能投影数据 P_m , 从而达到校正目的。

2.3 指数拟合法的思路

理想单色光衰减曲线应该符合(1)式的形式, 但是实际测量的曲线与理论曲线有较大偏差, 如

图 1、图 2 所示。希望找到一个比多项式拟合更接近真实结果的方法, 函数形式更简单, 最好和(1)式的形式差不多, 而且符合: 当 x 趋近于 $+\infty$ 时, y 趋近于 0。仔细观察可以看出实际曲线比理想单色光曲线的弧度更明显, 经过多次仿真试验, 得到

$$I = I_0 \exp(-\mu x^n). \quad (8)$$

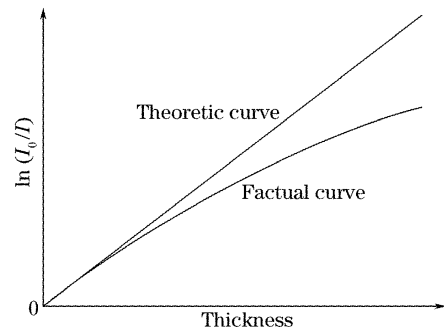


图 1 硬化效应示意图

Fig. 1 Graph of beam hardening effect

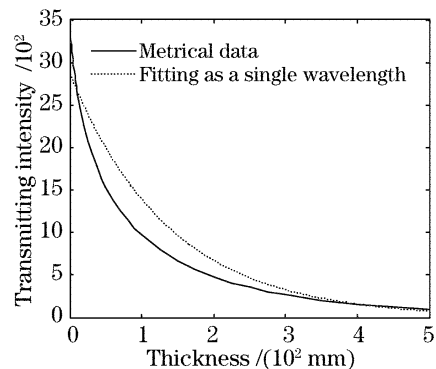


图 2 透射光强实测曲线和理想曲线对比

Fig. 2 Comparison of transmitting intensity by experiment and theory

因为方程里有 3 个未知数 I_0 、 μ 、 n , 所以只要联立 3 个方程即可得到相应插值曲线。所以找 3 个点 (x_1, I_1) 、 (x_2, I_2) 以及 (x_3, I_3) 进行插值运算:

$$\begin{cases} I_1 = I_0 \exp(-\mu x_1^n), & (9) \\ I_2 = I_0 \exp(-\mu x_2^n), & (10) \\ I_3 = I_0 \exp(-\mu x_3^n), & (11) \end{cases}$$

利用迭代逐次逼近法可以求出 I_0 、 μ 、 n , 求解程序框图如图 3。

3 指数校正法实验步骤及结果

3.1 原始数据的获取

使用 FAXITRON 公司的 MX-20 型数字 X 射线机, 其射线源大小为 0.02 mm, 射线管电流为 0.3 mA, 电压为 10~35 kV, 曝光时间为 0.1~999 s 可调, 由左右两个 CCD^[4] 拼接成大小为 50.8 mm × 101.6 mm、2048 pixel × 1024 pixel 探测器^[5]。射线

管电压为 35 kV,曝光时间为 2 s,实验样本是相同厚度的单一物质薄片,用不同张数的样本遮挡,并测量透过的 X 光强度,可以描绘出实际的 X 光衰减曲线,实验共测量了 36 个数据点,如表 1 所示。

表 1 实验测量记录值

Table 1 Metrical data of experiment

| Thickness | Density | Thickness | Density | Thickness | Density |
|-----------|---------|-----------|---------|-----------|---------|
| 0 | 3348 | 20 | 2239 | 125 | 796 |
| 1 | 3279 | 25 | 2076 | 150 | 664 |
| 2 | 3198 | 30 | 1939 | 175 | 560 |
| 3 | 3123 | 35 | 1821 | 200 | 477 |
| 4 | 3048 | 40 | 1713 | 225 | 408 |
| 5 | 2961 | 45 | 1618 | 250 | 353 |
| 6 | 2906 | 50 | 1533 | 275 | 306 |
| 7 | 2839 | 60 | 1386 | 300 | 266 |
| 8 | 2779 | 70 | 1257 | 350 | 204 |
| 9 | 2721 | 80 | 1148 | 400 | 159 |
| 10 | 2665 | 90 | 1052 | 450 | 125 |
| 15 | 2431 | 100 | 968 | 500 | 99 |

3.2 指数拟合

利用 2.3 的方法,在实测数据中取 (1, 3279), (20, 2239), (300, 266) 三个点进行计算,即 $x_1 = 1, x_2 = 20, x_3 = 300$; 对应 $I_1 = 3279, I_2 = 2239, I_3 = 226$ 。按照图 3 的编程框图编程计算,得到 $I_0 = 3495, \mu = 0.0639, n = 1.5432$ 。为了和多项式拟合法对比,程序中也按照(5)式写入了多项式拟合程序代码。图 4 是指数拟合和二次多项式拟合的结果对比,不难看出,指数拟合的结果要好得多。表 2 是指数拟合及多项式拟合的误差统计值,对于这套实验数据,4 阶多项式拟合的相对误差才能和指数拟

合的结果相当,5 阶多项式拟合的误差标准方差才能和指数拟合的结果相当。

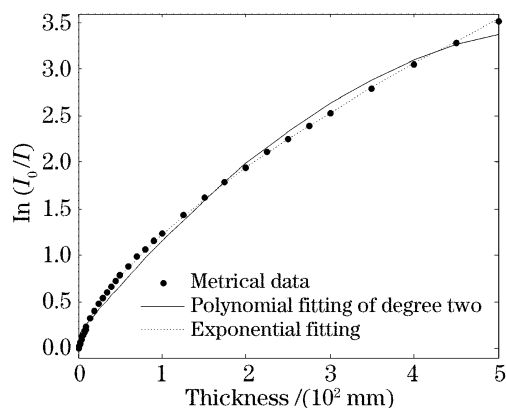


图 5 指数拟合与二次多项式拟合曲线

Fig. 4 Comparison of exponential and two-order polynomial fitting

表 2 不同拟合方法的误差统计结果

Table 2 Errors of different fitting methods

| Fitting method | Relative error | Standard deviation |
|---------------------|----------------|--------------------|
| Exponential fitting | 0.0431 | 0.0163 |
| Polynomial fitting | Order 2 | 0.1408 |
| | Order 3 | 0.0765 |
| | Order 4 | 0.0459 |
| | Order 5 | 0.0274 |

3.3 扇束光平面探测器逆投影计算层析重建验证

算法实现是计算层析的核心,目前针对点光源平面探测器扇束光计算层析重建,最成熟的是滤波逆投影算法^[6],是由拉东(Radon)变换公式推导出来的,实现步骤归纳如下:

1) 坐标变换:

$$\begin{cases} t(x, y, \beta) = y \cos \beta - x \sin \beta, \\ v(x, y, \beta) = x \cos \beta - y \sin \beta, \end{cases} \quad (12)$$

2) 计算总距离:

$$U(x, y, \beta) = R + v(x, y, \beta), \quad (13)$$

3) 计算投影图上的 a 方向的位置:

$$a = R \cdot t(x, y, \beta) / U(x, y, \beta), \quad (14)$$

4) 设定 S-L 卷积函数:

$$g(n) = \frac{-2}{\pi^2 T^2 (4n^2 - 1)}, \quad (15)$$

5) 卷积运算:

$$\tilde{P}(\beta, a) = \left[\frac{R}{\sqrt{R^2 + a^2}} p(\beta, a) \right] * g(n), \quad (16)$$

6) 逆投影重建:

$$f(x, y) = \int_0^{2\pi} \frac{R^2}{U(x, y, \beta)^2} \tilde{P}(\beta, a) d\beta, \quad (17)$$

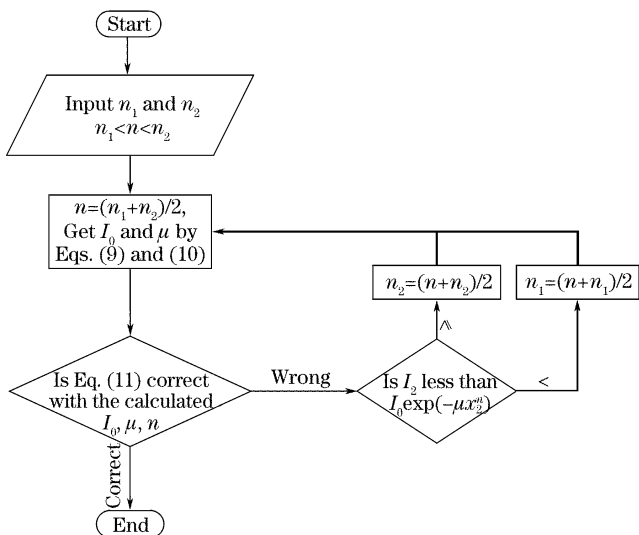


图 3 硬化效应指数拟合法参量求解程序框图

Fig. 3 Process of get the root of the exponential fitting parameters for beam hardening effect

以上 6 步就完成了整个重建过程。

实验对象为一根直径 15 mm 的有机圆柱。拍摄电压为 35 kV, 电流为 0.3 mA, 每一张曝光时间为 2 s, 旋转 360°, 共 400 张图片, 即每拍摄步进角为 0.9°。因为是单一物质所组成, 所以重建的圆形截面的灰度应该是均匀的。图 5(a) 是没有经过硬化修正后的结果, 很显然, 圆截面中心的密度较低, 而边

缘的密度较高, 产生了明显的“杯状”伪迹。图 5(b) 是指数法硬化修正后的结果, 可以看出, 整个截面的密度很均匀, 真实地反映了被测物体的密度, “杯状”伪迹消除。图 5(c) 是没有硬化校正的断层图直径方向上的灰度统计值; 图 5(d) 是硬化校正后的断层图直径方向上的灰度统计值。

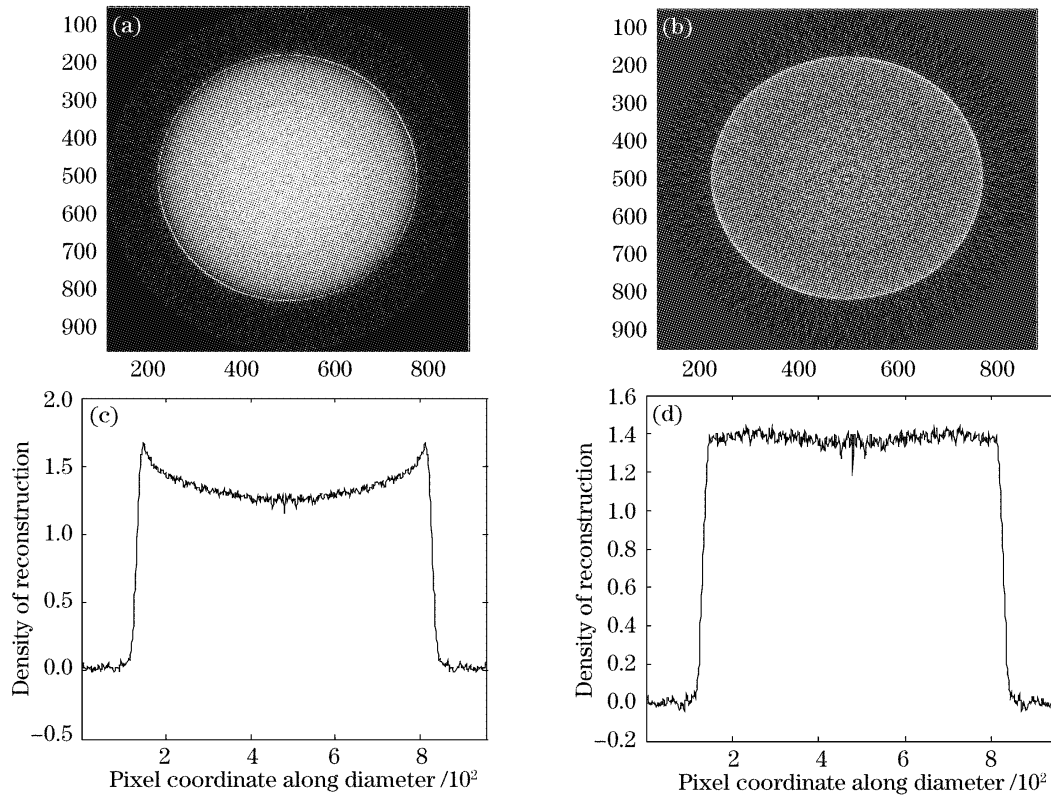


图 5 硬化效应修正前后重建效果对比。(a) 没有硬化校正的重建断层灰度图, (b) 硬化校正后的重建断层灰度图, (c) 没有硬化校正的断层图直径方向灰度值, (d) 硬化校正后的断层图直径方向灰度值

Fig. 5 Result with and without beam hardening correction. (a) Slice gray scale map reconstruction without beam hardening correction, (b) slice gray scale map reconstruction with beam hardening correction, (c) density curve along diameter without correction, (d) density curve along diameter with beam hardening correction

4 讨 论

指数拟合公式(8)中的 I_0 也可以看作已知数, 即光源直接打到感光板上所测得的光强。这样方程就有两个未知数, 只用联立两个方程就可以求解了, 而且很容易求出解析解。但是这样拟合的曲线的对误差和标准方差会大一些。指数拟合法中的核心参量是(8)式中的 n , 和射线管的电压有关, 而且和被测样本的物质组成有关。即对于同一种物质, 用不同的电压照射时的 n 值会不同, 而且用同一个电压照射不同物质时的 n 值也不同。理论上说, 拍摄多物质的物体, 比如小动物的身体时, 对不同物质的部分应该取不同的 n 值, 但是这是不可能的, 因为这正是所求的未知数。但是可以取一个经验上的平均 n

值进行投影图硬化校正, 该方法仍然会对重建切片图有明显的改善效果^[7]。(15)式是高通滤波函数, 所以会增加重建的断层图像的噪声, 这也是切片图像噪声明显强于原始拍摄图像噪声的原因。(17)式为全扫描方式, 用到 2π 范围的投影数据, 也可以使用短扫描^[8], 只用到全扫描将近一半的投影数据, 这样可以缩短整个程序的耗时。

5 结 论

指数拟合法可以很好地逼近射线硬化曲线, 达到 4 阶甚至 5 阶多项式拟合的逼近效果, 而且很容易编程实现。将其写入计算层析代码重建单一物质样本的断层图像时, 可以有效地消除由于硬化效应

产生的“杯状”伪迹。

参 考 文 献

- 1 Zeng Gang, Yu Zhongqiang, Yan Yonglian. Beam hardening correction based on Monte Carlo simulation[J]. *High Energy Physics and Nuclear Physics*, 2006, **30**(2): 178~82 (in Chinese)
曾 钢, 郁忠强, 阎永廉. 基于蒙特卡罗模拟的射线束硬化校正方法[J]. *高能物理与核物理*, 2006, **30**(2): 178~182
- 2 Zhang Quanhong, Lu Hongnian, Yang Min. Beam hardening correction using polynomial fitting based on reprojection [J]. *Optical Technique*, 2005, **31**(4): 633~638 (in Chinese)
张全红, 路宏年, 杨 民. 基于重投影的多项式拟和校正射束硬化[J]. *光学技术*, 2005, **31**(4): 633~638
- 3 Yang Min, Lu Hongnian, Lu Yuan. Method of beam hardening correction for CT reconstruction [J]. *Optical Technique*, 2003, **29**(2): 177~178, 182 (in Chinese)
杨 民, 路宏年, 路 远. CT重构中射线硬化的校正研究[J]. *光学技术*, 2003, **29**(2): 177~178, 182
- 4 Fu Jian, Lu Hongnian. Research on 2D-CT imaging technique based on flat panel detector[J]. *Optical Technique*, 2005, **31**(5): 662~665 (in Chinese)
傅 健, 路宏年. 基于平板探测器 2D-CT 成像技术的研究[J]. *光学技术*, 2005, **31**(5): 662~665
- 5 Fang Quan, Fang Zheng, Zhong Aijun *et al.*. Adjusting of cone-beam X-ray source of micro CT[J]. *Computerized Tomography Theory and Application*, 2006, **15**(2): 69~73 (in Chinese)
方 全, 方 正, 仲爱军 等. 锥束微型 CT 图像重建中射线源位置的修正[J]. *CT 理论与应用研究*, 2006, **15**(2): 69~73
- 6 L. A. Feldkamp, L. C. Danis, J. W. Kress. Practical cone-beam algorithm[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1984, **1**(6): 612~619
- 7 Marc Kachelriebe, Katia Sourbelle, Willi A. Kalender. Empirical cupping correction: A first-order raw data precorrection for cone-beam computed tomography[J]. *Medical Physics*, 2006, **33**(5): 1269~1274
- 8 Hengyong Yu, Ge Wang. Feldkamp-type VOI reconstruction from super-short-scan cone-beam data [J]. *Medical Physics*, 2004, **31**(6): 1357~1362

中国科学院上海光学精密机械研究所光学设计高级讲习班教材征订

中国科学院上海光学精密机械研究所光学设计高级讲习班于 2006 年 10 月 27 日胜利闭幕。现有少量讲习班辅导教材征订, 数量有限, 欲购从速。四本教材主要内容包括:

1) 王之江院士、徐文东研究员主讲光学系统设计

光学设计中的基本概念和问题: 光学系统的基本要求及指标、高斯光学、像差理论、成像质量和发展各种不同结构的光学系统的意义等的阐述, 结合现在流行的光学软件设计的基本功能进行介绍, 立足于当前具有代表性的产品设计进行实例的分析和讲解。

2) 朱健强研究员主讲光机系统设计和光学加工

本课程的内容涵盖了光机设计的原理、设计方法及常规内容。介绍各类光学元件加工的各个环节及其相关测控技术, 培养光学工程师所需掌握的必要光学加工工艺知识。平面、球面、透镜、棱镜等光学加工技术、非球面加工技术, 特种光学元件加工技术, 光学检测技术。

3) 范正修研究员主讲光学薄膜

从光学薄膜的一般性质出发, 讲述光学薄膜在激光系统, 光通信系统, 显示系统中的应用, 介绍极紫外和软 X 射线薄膜, 功能性光学薄膜。分析激光对光学薄膜的破坏过程。

教材目录:

《光学加工与检测技术》、《光学机械设计》、《光学设计》、《光学薄膜及其应用》。

征订形式:

- 1) 全套教材或电子版: 400 元
- 2) 全套教材+电子版: 500 元
- 3) 单本教材+电子版: 150 元

优惠办法:

中国光学期刊网会员购买全套教材赠送价值 100 元的期刊阅读卡一张。

征订办法:

联系人: 高老师 电话: 021-69918253 邮箱: gfhai@siom.ac.cn

邮购方法:

请直接汇款到以下地址:

邮编: 201800 地址: 上海市嘉定区清河路 390 号 收款人: 光学期刊联合编辑部