

用于混合处理 X 光层析术 的胶片特性研究

吕贻林 沈忙作

(中国科学院光电技术研究所)

提 要

本文分析了在光学和数字混合处理 X 光层析术中,记录正弦图的要求,提出了修正正弦图数据的方法,研究了胶片的颗粒噪声对重建像的影响,并推导出重建像的信噪比公式。最后,给出了重建像的实验结果。

一、引 言

X 射线计算机层析术(简称 CT),已广泛应用于医学和其它科学领域。由于价格昂贵,严重地限制了它的使用。因此,各种模拟装置的 CT 就逐渐引起了人们的重视^[1,2]。在几种方式的模拟处理中,光学方法和光电混合的方法,成本低、速度快,但成像精度较低。由于微型计算机价格便宜,而且具有数字处理的长处。同时,胶片又具有比 X 射线阵列探测器更高的空间分辨率和低得多的造价。所以,我们采用光-数混合处理的方法,即以胶片记录物体的投影,并用一台微机来重建图像,就有可能成为既经济又实用的方法。

本文以对层析模型的实测,详细分析和讨论了胶片的特性。

二、胶片特性的分析

1. 制作正弦图的要求及实测

记录物体任一断层截面的投影,可由胶片来实现^[3]。其光学记录系统,是由物体的转动和胶片的移动来完成该记录过程的。当物体转过 180°,胶片上就得到完整的投影数据。显影后的胶片称为正弦图。

曝光的胶片,显影后的光强透过率 t 与曝光量 E 的对数,在某一范围里有线性关系。由于

$$\ln E = -\ln(I_0/I) + \ln(I_0 t'), \quad (1)$$

式中 I_0 为 X 光的入射光强, I 为沿某一 ϕ 角 F 透过物体的 X 光强, t' 为曝光时间。再根据 X 光的吸收定律和投影的定义可得到

$$t = P(\mu, l) + C(I_0 t'), \quad (2)$$

式中 $P = \int \mu dl$, 为投影值。 μ 为材料对于 X 光的吸收系数, l 为材料的厚度, C 只与入射曝光量有关。对于均匀的吸收系数 μ , 有

$$t = \mu \cdot l + C(I_0 t') \quad (3)$$

由(2)或(3)式可看到, 对于每次确定的曝光, C 是常数。这时, t 仅随投影值 P (或 μ 、 l) 变化, 并且在一定的范围里是线性的。

在以后的分析中, 对于具有不同的吸收系数和均匀的吸收系数的情况, 将分别对应以 $t-P$ 曲线和 $t-l$ 曲线(见图 1)来讨论。这两种情况的曲线形式是一致的, 只不过, 在 $t-P$ 曲线中, P 坐标值为相对值, 而在 $t-l$ 曲线中, l 坐标值为材料的厚度。

胶片记录的有效部分是图 1 所示的线性段, 即动态范围内。由理论和实验都很容易证明: (1) 不同材料, 其动态范围是不同的, μ 大, 其动态范围小, μ 小, 其动态范围大; (2) 相同材料, 用不同的入射曝光量, 其动态范围不变, 只是 $t-P$ 曲线产生平移。掌握这两点, 对在记录正弦图时, 保证被记录物体的信息不丢失是很有用的。

在光学记录系统中, 由于 X 光是经过准直狭缝后照射物体, 所以得到的正弦图是理想的投影值与狭缝宽度的卷积。这会使得沿正弦图长度方向(沿投影数方向)的空间分辨率降低。因而, 在正弦图长度 L 一定时, 狭缝宽度必然会限制投影的有效数目。所以, 记录正弦图时, 应选择适当的缝宽。

我们在实验室里记录了一张正弦图, 见图 2(a)。图 2(b)所示的阶梯板照片, 是与记录正弦图相同的曝光条件下, 记录在同一张底片上, 用在必要时, 修正正弦图数据。图 3 是实物模型的断层截面图。实验中, 采用天津工业 X 光胶片和上海钨酸钙增感屏。物体的转动和胶片的移动都是连续的。X 光焦点至胶片的距离为 1300 mm, 狭缝宽度 $l_s = 2$ mm, X 光机(GTY-200-20 型)管电流为 15 mA, 管电压为 30 kV, 整个曝光时间为 90 sec。

2. 正弦图数据的修正

在正弦图上, 投影值 P 的大小是通过透过率 t 反映出来的。当直接用正弦图重建图像时, 认为透过率 t 与投影值 P 成线性关系, 且其线性方程通过 $t-P$ 曲线的坐标原点。但实际的 $t-P$ 曲线, t 和 P 的关系是非线性的(见图 1), 即使 P 值全部落在线性段, 该直线也不一定通过原点, 其线性方程一般为 $t = P + C$, $C \neq 0$ 。因此, 若直接用原始正弦图重建图像, 会使重建像的对比度变差, 并有可能发生畸变。

为了克服 $t-P$ 曲线的非线性影响, 可用曲线拟合的方法, 对正弦图数据进行修正。找出一定范围内 t 与 P 的非线性关系的方程, 然后将 t 值赋给 P 值, 而得到真实的投影值。这样, 不仅消除了常数 C 的影响, 而且又能在一定程度上校正超出动态范围的非线性部分的价值。

对于图 2 所示的正弦图, 用一个三次多项式对其相应的 $t-P$ 曲线进行拟合, 得到

$$P(t) = -39.233 + 1.8216t - 0.0213t^2 + 0.0009t^3 \quad (4)$$

的三次拟合曲线, 见图 4。通过(4)式的运算, 便可得到该正弦图的修正值。

3. 胶片的颗粒噪声对重建像的影响

在一般情况下, CT 重建像的噪声来源于 X 光量子统计起伏(即量子噪声)^[3], 增加 X 光的照射剂量可以提高重建像的信噪比。但是, 在用增感屏——胶片记录投影数据的条件下, 增大 X 光剂量并不能无限度地增加信噪比。因为 X 光剂量增加到某一程度时, X 光的量

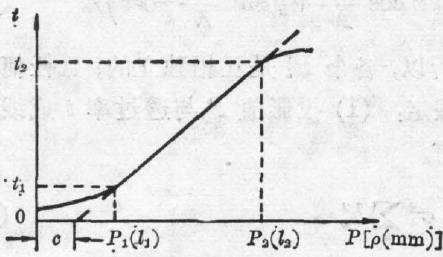


Fig. 1 t - P (or t - l) curve



(a) Sinogram (b) Step plate

Fig. 2

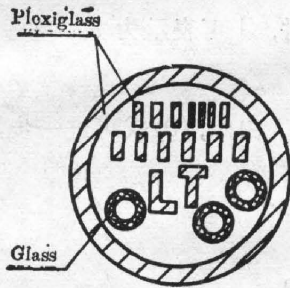


Fig. 3 Section of the cross model

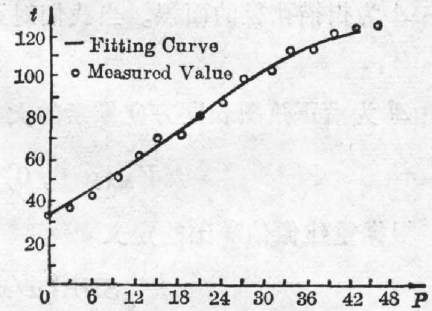


Fig. 4

子噪声将被胶片固有的颗粒噪声所淹没, 这时, 胶片的颗粒噪声就决定了 CT 重建像所能达到的信噪比的极限。所以, 对于胶片记录的 X 光层析系统, 在低 X 光照射剂量时, 量子噪声决定了 CT 重建像信噪比的下限, 在 X 光高照射剂量时, 胶片的颗粒噪声决定了 CT 重建像信噪比的上限。在这里, 我们只讨论胶片颗粒噪声对重建像的影响。

在数字重建中, 对于实际的离散数据, 设在 180° 内共测得 N 个投影, 每投影射线数 (每个投影中的取样点数) 为 M , 采样间隔为 τ , 则重建像为^[4]

$$\mu(x, y) = \frac{\pi\tau}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{k=-\frac{M-1}{2}}^{\frac{M-1}{2}} P_i(k\tau) h\left(x \cos \frac{\pi i}{N} + y \sin \frac{\pi i}{N} - k\tau\right), \quad (5)$$

其中, h 为滤波器函数, P_i 为投影值, $M=2m+1$, m 为整数。

由于胶片颗粒噪声的存在, 使得投影值 P_i 有随机起伏, 用 P'_i 表示, 则重建像

$$\mu(x, y) = \frac{\pi\tau}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{k=-\frac{M-1}{2}}^{\frac{M-1}{2}} P'_i(k\tau) h\left(x \cos \frac{\pi i}{N} + y \sin \frac{\pi i}{N} - k\tau\right), \quad (6)$$

它也是随机函数, 其噪声方差为

$$V_{or}\{\mu(x, y)\} = V_{or}\left\{\frac{\pi\tau}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{k=-\frac{M-1}{2}}^{\frac{M-1}{2}} P'_i(k\tau) h\left(x \cos \frac{\pi i}{N} + y \sin \frac{\pi i}{N} - k\tau\right)\right\}, \quad (7)$$

均值为

$$E\{\mu(x, y)\} = E\left\{\frac{\pi\tau}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{k=-\frac{M-1}{2}}^{\frac{M-1}{2}} P_i^f(k\tau) h\left(x \cos \frac{\pi i}{N} + y \sin \frac{\pi i}{N} - k\tau\right)\right\}. \quad (8)$$

在正弦图上, 采样点的面积远大于胶片的颗粒尺寸, 所以, 各个 P_i^f 是互相独立的, 且任何两条射线的值是不相关的。为简化计算和分析, 我们假定: (1) 投影值 P 与透过率 t 成线性关系, (2) 物体为圆对称且只考虑中心那一点。于是有

$$V_{ar}\{\mu(0, 0)\} = \frac{(\pi\tau)^2}{N} \sigma_t^2 \sum_k h_k^2 \quad (9)$$

和

$$E\{\mu(0, 0)\} = \pi\tau\bar{t} \sum_k h_k, \quad (10)$$

其中, σ_t 为透过率的均方根值, \bar{t} 为胶片的平均透过率。

由于 σ_t 与相应的密度均方根 σ_D 的关系为

$$\sigma_t = \bar{t} \cdot \sigma_D / 0.4343, \quad (11)$$

而且, σ_D 与胶片的颗粒度 B 成正比, 为

$$\sigma_D = B / \sqrt{A}, \quad (12)$$

式中 A 为扫描孔径的面积。当我们对正弦图作数字化处理时, A 可表示为

$$A = \Delta l \cdot H_x' / M, \quad (13)$$

式中 Δl 为沿正弦图长度方向像素的大小, H_x' 为正弦图宽度。由此, (9) 式可进一步写为

$$V_{ar}\{\mu(0, 0)\} = \frac{M(\pi\tau\bar{t}B/0.4343)}{N \cdot \Delta l \cdot H_x'} \sum_k h_k^2. \quad (14)$$

根据重建像信噪比的定义

$$\text{SNR}\{\mu(x, y)\} = \frac{E\{\mu(x, y)\}}{\sqrt{V_{ar}\{\mu(x, y)\}}}, \quad (15)$$

利用(10)式和(14)式, 可得到中心一点的信噪比为

$$\text{SNR}\{\mu(0, 0)\} = \frac{0.4343 \sqrt{N \cdot \Delta l \cdot H_x'} \sum_k h_k}{B \sqrt{M} \sqrt{\sum_k h_k^2}} \quad (16)$$

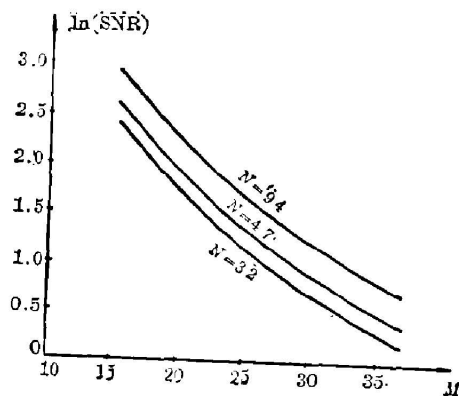


Fig. 5 SNR versus M and N

由此可见, 选用不同颗粒度的胶片, 投影数 N (当 Δl 不变时)、滤波器函数 h 和射线数 M , 均可改变重建像的信噪比。根据(16)式, 可得到信噪比与 M 和 N 之间的关系, 见图 5。计算中, 采用 Shepp-Logan^[4] 滤波器和天津工业 X 光胶片, 并取 $H_x' = 43 \text{ mm}$, $\Delta l = 0.96 \text{ mm}$, N 分别为 94、47 和 32 三种情况。从图中可看到, 增加 N , 能提高重建像的信噪比, 而当 M 增大时, 重建像的信噪比变差。在数字处理中, M 数反映了图像的空间分辨率, M 越大, 空间分辨率越高。所以, 重建像的空间分辨率和信噪比不可能同时达到最佳。因此, 可以对同一张正

弦图作两次重建成像处理。一次高 M 数, 以得到高空间分辨图像; 另一次则尽量减小 M 数, 以得到高信噪比图像。

三、实验结果及讨论

我们用 CIMP-1 微型计算机图像处理系统^[5]对正弦图作数字化和重建处理。分别用正弦图和修正的正弦图数据, 以 $N=94$ 、47、32 三种情况, 给出了重建像的结果, 见图 6 和图 7。重建像的大小均为 87×87 。

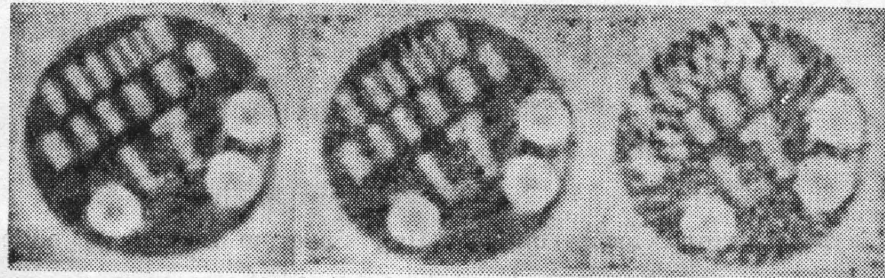
(a) $N=94$ (b) $N=47$ (c) $N=32$

Fig. 6 Images reconstructed from uncorrected sinogram

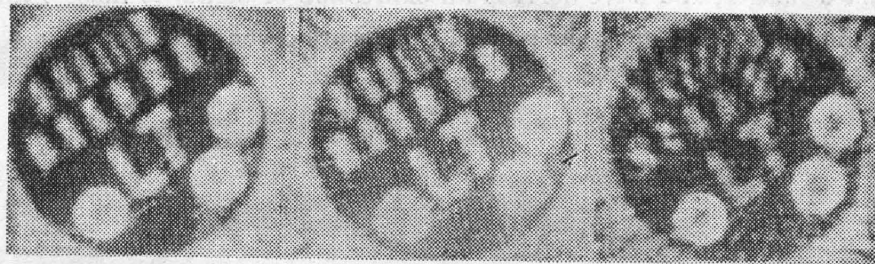
(a) $N=94$ (b) $N=47$ (c) $N=32$

Fig. 7 Images reconstructed from corrected sinogram

(1) 由图可见, 重建的断面像准确地反映了模型的真实情况。玻璃管的截面最亮, 有机玻璃次之, 空隙处最暗。它们分别对应于 X 射线的不同吸收系数。从条状有机玻璃目标上看出, 重建像的分辨率接近于 1mm 。实验表明, 所使用的混合处理系统是成功的。

(2) 由图 6 和图 7 的比较, 可明显地看出, 用修正的正弦图重建的图像, 其质量要好得多。这说明修正正弦图的方法是可行的。

(3) 当投影数目较少, $N=32$ 时, 重建像中带有明显的莫尔条纹状的噪声, 空间分辨率低。当 $N=47$ 时, 条纹状噪声减弱, 具有较好的空间分辨率。当 $N=94$ 时, 尽管投影数目增加了一倍, 但其空间分辨率并无明显提高。可见, 正弦图上, 其独立的有效投影数目是有限的, 它要受到在记录正弦图时, 狭缝宽度的影响。但随着 N 的增加, 却能使噪声降低, 提高重建像的信噪比, 当然, 代价是计算时间的增加。

参 考 文 献

- [1] H. H. Barrett, W. Swindell; *Proc. IEEE*, 1977, 65, No. (Jan), 89.

- [2] A. F. Gmitro *et al.*; *Opt. Eng.*, 1980, **19**, No. 3, 260.
[3] A. Rosenfeld, A. C. Kak; *Digital Picture Processing*, (Academic Press, New York, 1982), **1**, 369.
[4] L. A. Shepp, B. F. Logan; *IEEE Trans on Ns*, 1974, **ns-21**, No. 6 (Jun), 21.
[5] 吴成岳; *计算机应用通讯*, 1983, No. 4, 33.

Investigation on film characteristics for hybrid processing X-ray tomography

LÜ GANLIN AND SHEN MANGZUO

(*Institute of Optics and Electronics, Academia Sinica*)

(Received 28 May 1985)

Abstract

In this paper, requirements on recording sinogram in hybrid optical/digital processing X-ray tomography are analysed. The method of correcting sinogram data is described. We have investigated the effect of film granularity on the noise of reconstructed images, and have derived an expression of signal-to-noise ratio. Finally the experimental results for reconstructed images are given.