

# Micro CT 投影图像噪声的去除<sup>1</sup>

董歌, 罗守华, 王松, 张蔚

东南大学生物科学与医学工程学院, 南京 (210096)

E-mail: [donggedg@163.com](mailto:donggedg@163.com)

**摘要:** 本文以提高 Micro CT 系统重建图像的质量为目的, 分析了 Micro CT 投影图像的噪声形成因素: 随机噪声、偏置误差、像元响应不一致、瑕疵像元、光场不均匀等, 提出了 Micro CT 投影图像校正的方法, 对随机噪声、暗场、光场、响应不一致和瑕疵像元进行了校正, 去除了随机噪声, 消除了环状伪影, 通过比较研究提出了一种简单实用的实际响应不一致校正, 该方法结合了光场、暗电流、增益不一致校正, 只一次循环就解决了三种校正, 大大提高了算法效率, 节省了计算时间, 并用实验证明了该校正方案的有效性, 提高了投影图像的质量, 为后续三维重建等工作奠定了良好的基础。

**关键词:** Micro CT 投影图像; 图像噪声; 图像校正

## 1. 引言

投影图像是 Micro CT 系统的根基, 投影图像质量的好坏将直接影响 Micro CT 的检验效果。然而, 由于各种因素的影响, 投影图质量往往很差, 存在着严重的噪声, 极大地限制了 Micro CT 优势<sup>[1]</sup>的发挥。因此, 如何有效地提高 Micro CT 系统投影图质量是 Micro CT 系统达到实用阶段所必须解决的一个重点问题, 本文以提高投影图质量为目标, 将对影响最严重的探测器输出误差进行校正, 以提升重建切片质量, 满足 Micro CT 的要求, 所进行的校正研究工作具有重要的工程应用价值。

## 2. Micro CT 投影图像的噪声因素分析

平板探测器的出现是锥束 CT 能够得以快速发展的主要原因, 与线性阵列探测器相比, 平板探测器可以获得更大面积的探测区域, 并且可以获得很高的空间分辨率, 对于一定大小的物体仅仅通过一次扫描就可以对物体进行三维重建, 而且可以保证在各个方向获得同样的分辨率, 可以对物体进行高分辨率的三维重建, 因此随着制造工艺的进步, 平板探测器逐渐取代线性阵列探测器。但平板探测器也带来了比线性探测器更严重的性能缺陷。X 射线源的不同、接收器内电子线路的不一致性及其正常变化, 都会引起平板探测器上不同像元在同样 X 射线剂量辐射的情况下具有不同的输出信号。这些性能缺陷都将严重影响三维重建质量, 因此, 寻求有效的探测器性能缺陷校正方法对高质量重建断层图像有重大的意义。其主要的性能缺陷有如下几个方面<sup>[2]</sup>:

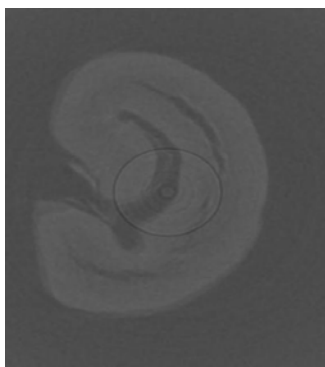


图 1 原始图像

<sup>1</sup> 本课题得到国家自然科学基金, 教育部 985 建设计划, 苏州市科技平台项目的资助。

## 2. 1 随机噪声

根据X射线平板检测器的原理,从X射线到可见光的转换、后续的光电转换和模数转换等都不可避免的伴有随机噪声的产生。

## 2. 2 偏置误差

平板探测器中感光元件(响应元件)为非晶硅材料,在没有x射线照射的情况下,探测器各像元仍有一定的输出值,这是由于光电二极管和薄膜晶体管的漏电流以及数据采集电路中电荷放大器零点漂移等因素的影响,这就是偏置误差(称为暗场图像),是一种系统误差。理论上,探测器响应呈线性,反映的是穿过零件的X射线衰减情况,但实际上,只有在一定的X光强度范围内探测器响应才呈线性,超过此区域则趋于饱和,故需将探测器输出图像像素值校正到线性响应区域内。暗场图像即表现为响应曲线的纵截距,如不校正,重建图像中将出现伪影。

## 2. 3 像元响应不一致

探测器在均匀强度X射线的照射下,各像元的响应通常也是不均匀的,它与像元接收到的射线剂量到像元图像灰度值转换的整个过程有关。首先,各像元对应的X射线/可见光转换、光/电转换及电荷放大程度各不相同;此外,探测器中用到的电荷放大器因工艺所限不可能做得很宽,所以只能将多片集成的放大器拼接在一起,于是又产生了不同放大器模块之间放大程度的差异,这样就产生了像元响应不一致性。如不加以校正,将导致重建出的切片图像存在环形伪影。

## 2. 4 瑕疵像元

由于成像元件破坏、接触不良等现象,导致该响应元件失灵,形成短路、断路和不稳定,从而使投影图像中该点像素值不能正确反映射线穿透物体时的衰减情况,这种不能依据射线强度做出合理响应的像元称为瑕疵像元。随着探测器使用时间的增加,探测器响应元件老化将导致新的坏像素出现。所以,必须对投影图像中瑕疵像元进行校正,否则重建切片中将出现环形伪影。

## 2. 5 光场不均匀

Micro CT系统中,X射线源为一微焦点射线源,近似于点光源,在整个锥角范围内发射出的X射线强度并不均匀,并且到达平板探测器边缘像素所穿过的空气厚度与到达探测器中心所穿过的空气厚度也不相同,这导致无零件照射时,平板探测器上的X光强度分布并不相同,称为光场不均匀现象,它也会对平板探测器的输出造成负面影响。光场不均匀现象将导致重建切片中产生环形伪影。

## 3. 校正方案

针对上面分析的几大校正因素,分别进行校正。

根据CT原理和以上分析的几个影响因素建立数学模型<sup>[3]</sup>:

$$I(r,t) = B(r,t) + K(r,t) \times N_i(r,t) + S(r,t) \quad (1)$$

$$K(r,t) = k_1(r) \times k_2(r,t) \times k_3(r,t) \quad (2)$$

其中 $r$ 表示探测器像元坐标， $t$ 表示时间， $I(r,t)$ 表示探测器的输出， $B(r,t)$ 表示暗电流输出， $k_1(r)$ 表示平板探测器像元的量子探测效率， $k_2(r,t)$ 表示探测器像元增益响应系数， $k_3(r,t)$ 表示光场强度系数，实际响应系数 $K(r,t)$ ， $N_i(r,t)$ 表示x射线源发射光子数量， $S(r,t)$ 为随机噪声。

如何测量反映成像系统图象质量的性能参数，以便能够客观、准确地评价和优化这些参数，对均匀物体成像后系统成像均匀性可以用图像的均方根RMS大小表示。RMS值从总体上可以说明X射线图像密度分布的不均匀性即噪声的大小。RMS值越大说明系统的噪声越高，均匀性下降。

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i \sum_j (S_{ij} - \bar{s})^2} \tag{3}$$

$N$ 为图像 $S$ 总的像素， $\bar{s}$ 为图像灰度均值

$$\bar{s} = \frac{1}{N} \sum_i \sum_j S_{ij} \tag{4}$$

### 3. 1 随机噪声的消除

对于随机噪声 $S(r,t)$ ，最有效的消除方法就是采用多幅图像叠加取平均值的经典方法<sup>[4]</sup>对均匀射线辐射探测器所获得的图像(由12bit的图像采集卡获得，下同)进行分析，

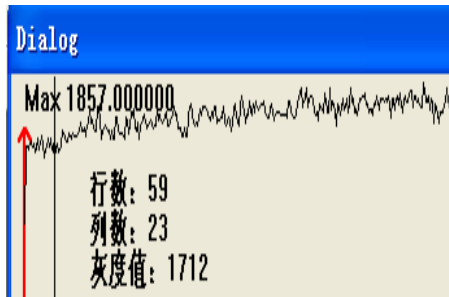


图 2 图像单行灰度曲线图



图 错误! 文档中没有指定样式的文字。 四幅图像求平均后同位置灰度曲线

由上面两幅图分析得： 四幅图像求平均后明显抑制了随机噪声，噪声标准差RMS由28降到25，噪声下降10.7%之多。

### 3. 2 暗场图像校正

在不打开X射线源条件下采集到的探测器输出图像即为暗场图像，采集 $M$ 幅暗场图像平均以消除静电噪声影响。

$$B(r) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M B_i(r,t) \tag{5}$$

暗场图像校正时将投影图像  $P(r)$  与暗场图像做图像剪影即可，即：

$$P'(r) = P(r) - B(r) \quad (6)$$

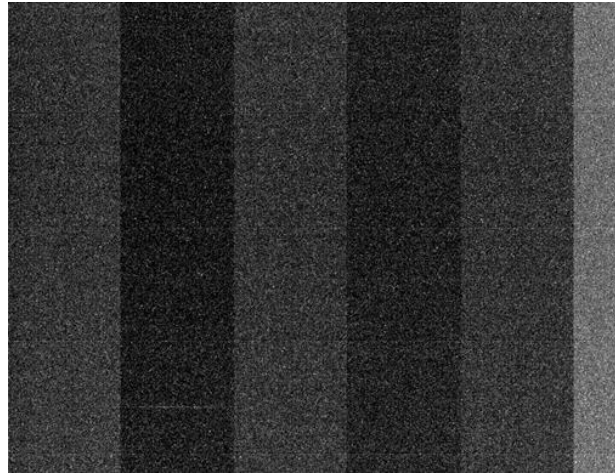


图 4 调窗后的暗场图像

经过调窗后，可以明显发现暗场图像成条块状分布，暗电流影响非常明显。

### 3. 3 光场校正

由于从平板探测器中采集的任何形式的投影图像中均含有光场强度系数、增益响应系数和探测器量子探测效率的乘积，很难将其分离。本文采用平滑拟合的方法来消除探测器象元增益的影响，将拟合出图像的作为光场图像。

在打开X射线源，旋转工作台上无扫描零件条件下，采集的M幅投影图像(称为均匀曝光图像)，取其平均图像以消除静电噪声影响，有：

$$I(r) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M I_i(r, t) \quad (7)$$

$$S(r) = I(r) - B(r) \quad (8)$$

信号图像采用多次中值滤波和高斯滤波逼近，得到光场图像，然后选取图像中心像素灰度值M进行归一化，得到光场校正系数图：

$$S_r(r) = \frac{M}{S(r)} \quad (9)$$

光场校正时将投影图像每个像素值乘以光场校正图像的对应像素值即可。

$$P''(r) = P'(r) \times S_i(r) \quad (10)$$

其中  $P''(r)$  表示暗场图像校正后的投影图， $P'(r)$  表示光场校正后的投影图。

### 3. 4 响应不一致校正

根据公式(2)，这里的响应不一致并不是单纯的增益响应不一致，而是平板探测器像元的量子探测效率  $k_1(r)$  和表示探测器像元增益响应系数  $k_2(r, t)$  的乘积，这里称之为响应不一致。为了对响应不一致性进行校正，首先需要掌握各点的响应特性，这就需要采集并

分析校准图像。在实际工作中，分别在3种不同射线辐射状态下采集校准图像：①在没有X射线辐射探测器的情况下获取一幅图像，前已提及，称为暗场图像；②在能使各像元和电子线路饱和的均匀X射线照射探测器的情况下获取一幅图像，称为亮场图像；③在亮场图像所用剂量70%左右的X射线均匀照射下采集一幅图像，称为中亮场图像。在采集校准图像时，为消除随机噪声的影响，一般应该采取多幅叠加取平均的方式。对探测器不一致性的校正正常采用线性校正<sup>[5,6]</sup>。

由前面对偏置误差的分析可知，这里的暗场图像实际上就代表了偏置误差。若用中亮场图像与暗场图像相减，得到的差值就是各像元在中亮场射线强度下的响应。同理，由于各种射线条件下得到的图像都包含了暗场图像所代表的偏置误差成分，所以任意两幅图像相减的结果，就是二者对应射线剂量的差值在各像元的实际响应。这样，利用3幅校正图像，对于每一像元，都可得到一条灰度值随射线强度变化的响应曲线，也就可获得图像校正值随原始灰度值的变化曲线。即采用直线段拟合响应对平均灰度的响应曲线。

下图为某点的灰度校正曲线，其中，横坐标表示原始灰度值P，纵坐标对应校正输出Q， $P_d$ 、 $P_m$ 、 $P_l$ 分别代表该像元在暗场、中亮场和亮场图像中的对应灰度值。暗场图像像元灰度值的校正输出 $Q_d$ 对应灰度0，亮场图像像元灰度值的校正输出则可以根据实际需要确定为某一恒定值，如像元灰度为12bit，则 $Q_l$ 取4095。中亮场的校正值 $Q_m$ 可以根据暗场和亮场的对应值，结合射线强度差求得，或根据3幅图像的灰度均值用下式近似得到：

$$Q_m = \frac{P_{mm} - P_{dm}}{P_{lm} - P_{dm}} \times Q_l \tag{11}$$

式中 $P_{dm}$ ， $P_{mm}$ ， $P_{lm}$ 分别是暗场、中亮场和亮场图像的灰度平均值。

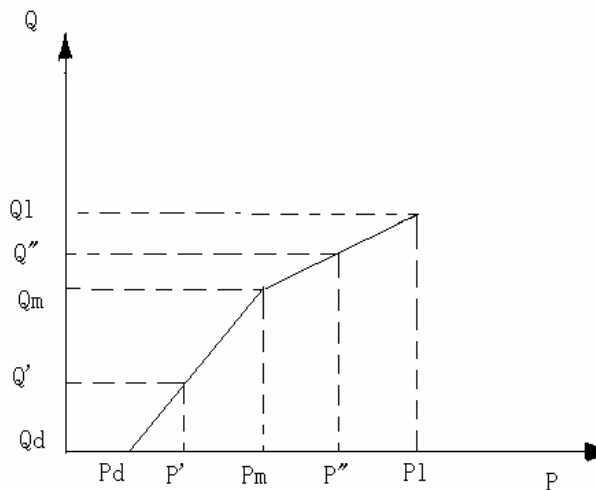


图 5 某像元的灰度校正曲线

对于任意一幅需要校正的图像，校正值根据P值与中、亮场灰度的对比关系，对应上图中分段线性校正曲线的上半段或下半段。实际利用下式计算：

$$Q = \begin{cases} \frac{p - p_d}{p_m - p_d} \times Q_m & p < p_m \\ \frac{p - p_m}{p_l - p_m} \times (Q_l - Q_m) + Q_m & p > p_m \end{cases} \quad (12)$$

### 3.5 瑕疵像元校正

坏像素根据其形成原因可分为两大类,第一类是暗电流输出超界像素,包括无输出的断路或无效像素,或具有饱和输出的短路像素;第二类为输出响应异常像素,它们需要在X射线曝光条件才能被发现,包括不稳定响应像素和响应超界像素。前者的特征是其输出值的方差很大,超出正常范围;后者的特征是其响应曲线斜率很大或很小,超出正常范围<sup>[7]</sup>。

短路和断路的坏像素点均可由均匀曝光图像和暗场图像通过通过门限值的方法鉴别出来: 设定门限值high\_thresh和low\_thresh, 扫描均匀曝光图像, 其中像素灰度值大于high\_thresh的为短路坏像素, 小于low\_thresh的为断路坏像素。也可将门限值设为自适应的以适应不同扫描级别的均匀曝光图像, 对均匀曝光图像做灰度统计直方图, 如图6所示。

确定门限方式有两种: 根据已知的坏像素百分比a确定门限灰度值。还可以根据和平均灰度的差设门限high\_thresh和low\_thresh, 超过门限的即定为坏点<sup>[8]</sup>。

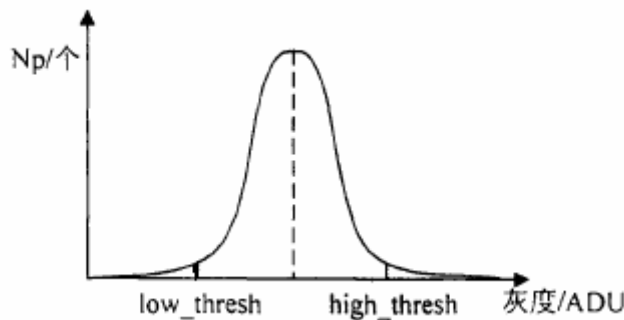


图 6 均匀曝光图像灰度统计分布图

针对光场不均匀的造成的漏检, 可以利用改进中值滤波的判断方法找出相对周围点响应异常的坏点。

设  $X(t)$  为待处理的点,  $X_i$  为  $X(t)$  周围  $3 \times 3$  邻域的8个, 伪代码如下:

if {  $\text{Min} ( X(t) - X_i ) > \text{Max}( X_i ) / m$  } or {  $\text{Min} ( X_i - X(t) ) > X(t) / n$  }

则  $X(t) = \text{Median} ( X_i )$

改进中值滤波对  $3 \times 3$  邻域进行判断, 相对周围8个邻域点为异常暗点或者亮点定性为坏点。调整  $m, n$  的值可以调节检索灵敏度。

坏像素模板图中定义为坏像素的才进行中值滤波, 有效保留了细节。

## 4. 实验结果及其讨论

### 4.1 暗场图像

首先获取暗场图像，无试件获取4幅暗场图像，由4幅暗场图像得到平均暗场图像。

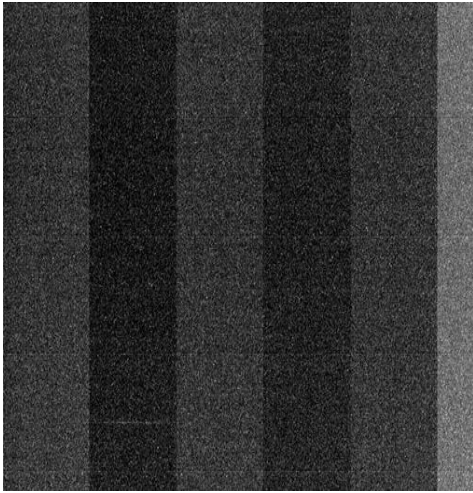


图7 单幅暗场图像

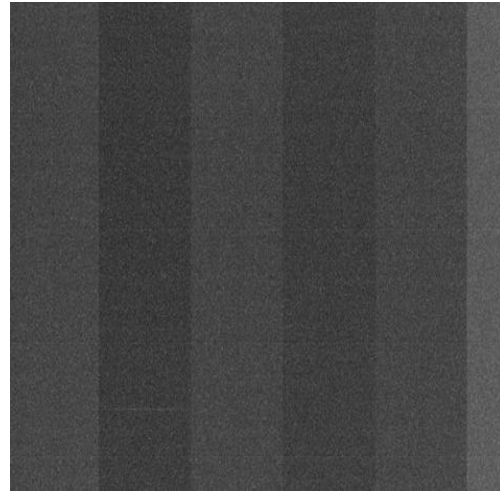


图8 多幅平均后暗场图像

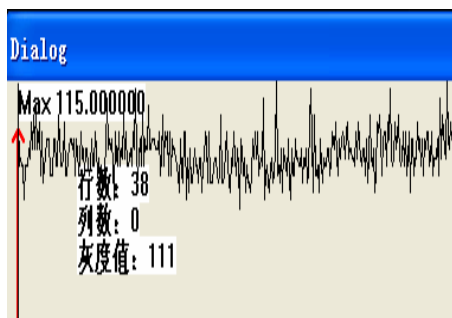


图9 单幅暗场图像某行灰度曲线

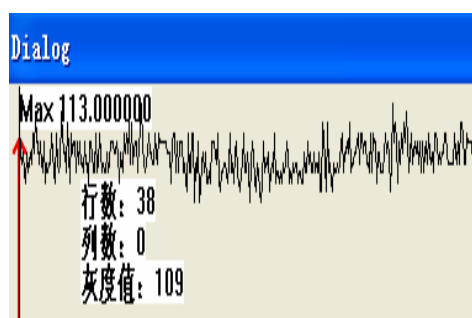


图10 4幅图像叠加求平均后的同上图位置的灰度曲线

将4幅暗场图像平均得到图8这幅图像，为了更清楚的显示暗场图像，调整了窗宽窗位，暗场平均灰度为106，灰度值不仅不为零，而且还呈条块状分布，这是由于技术工艺的限制，平板探测器不能整块制造，而是由几块板拼接而成。经四幅图像叠加求平均后，从图8明显看出去除了随机噪声，噪声标准差RMS由9降为2，降幅达77.8%，所以多幅平均有很好的去随机噪声效果。

### 4.2 光场图像

采集4幅均匀场曝光图，先四幅叠加取平均，然后去偏置误差得到图 11，在计算得到图 12光场校正系数图，图13为四幅叠加取平均图的单行灰度曲线。图11可以明显看到亮度不均的条纹和斑点存在，从图 14的单行灰度曲线图上可以看到，经过去偏置误差后灰度曲线起伏变小，噪声降低，图 15为经过平滑拟合之后的光场校正系数图单行灰度曲线图，曲线很平滑，起伏较小，得到较好的光场校正系数图像。针对不同的X射线强度获取光场校正系数图，然后再叠加获取用于校正的光场校正图。

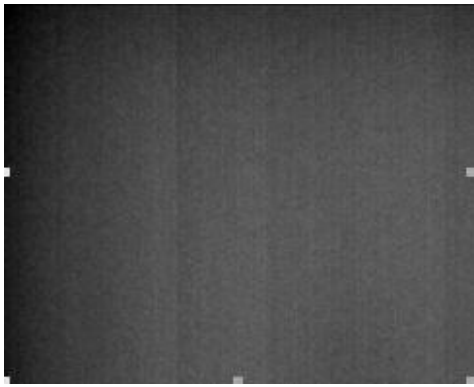


图 11 均匀场偏置校正图

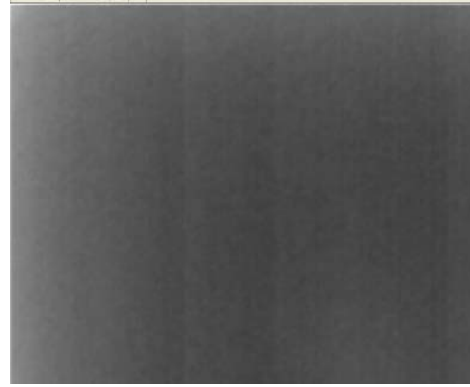


图 12 光场校正系数图

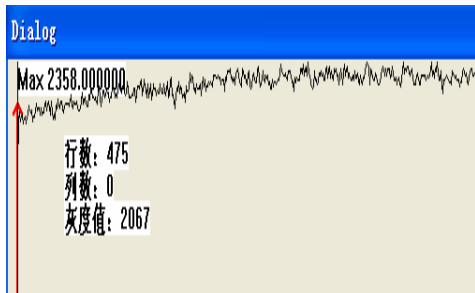


图 13 多幅叠加求平均后的单行灰度曲线

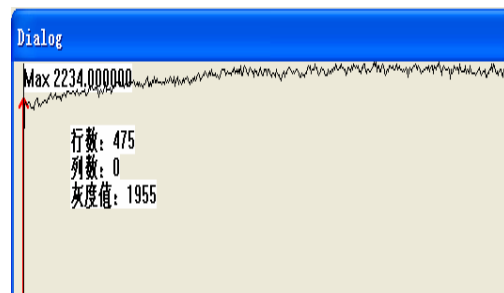


图 14 多幅叠加平均后并去偏置误差的单行灰度曲线图

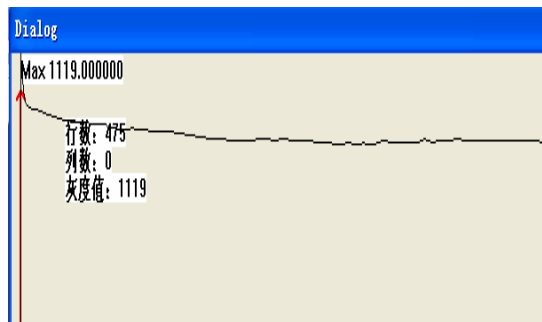


图 15 光场校正系数图单行灰度曲线

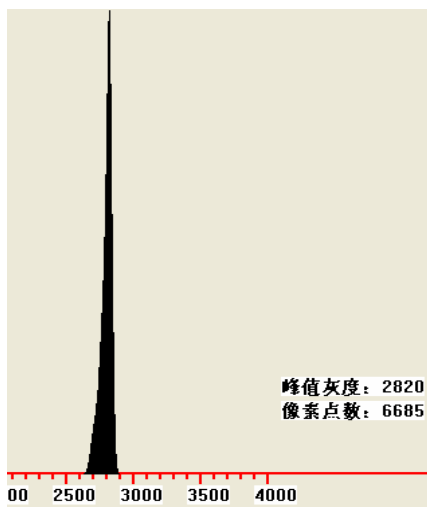


图 16 光场校正前直方图

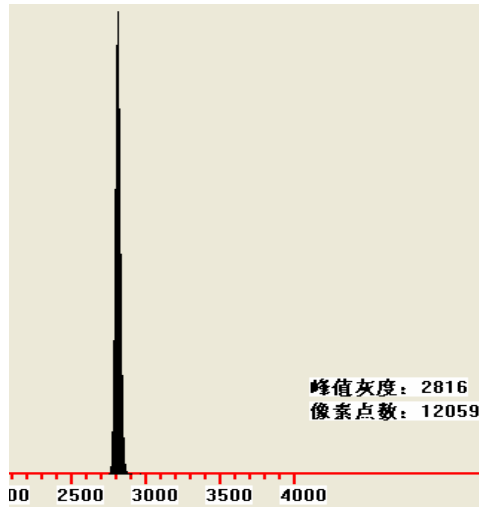


图 17 光场校正后直方图

对一幅均匀场图像进行光场校正，校正前灰度分布比较分散，经校正后灰度特别集中，达到了预期效果。噪声标准差RMS由45降到13，降幅超过71%，降噪效果明显。

### 4.3 坏像素模板图像

利用  $Average \pm Average/10$  为上下门限和改进中值滤波判断进行复合检索得到坏像素。

$Average$  为图像平均灰度值。

对不同X射线强度的均匀场图像进行检索，检索前先进行多幅叠加平均，然后去偏置误差，检索得到1073个坏像素（坏像素位置置为1000，好像素置为0），坏像素比例为1%。左右。对坏像素模板图18分析得：坏像素大量出现在图像的边缘部位，而中心区域坏像素其实并不多，原因可能有两个：一是光场不均匀造成边缘的光子数相对较少，与均值偏差较大，容易被误认为坏点；二是边缘一般为有效区域之外，响应异常。解决方法：检测坏点之前先对图像进行光场校正，然后再检测坏点，或者考虑不处理边缘像素。

光场校正后的检测到的坏点数为287

不考虑边缘像素检测得到的坏点数为370

说明光场校正有效降低了由于光场不均匀的因素导致的将好像素误认为是坏像素。

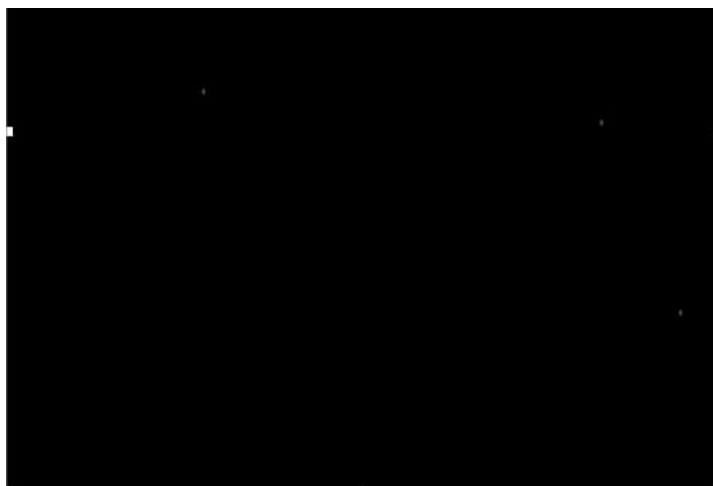


图 18 坏像素模板图

### 4.4 像元响应不一致校正

将偏置误差校正、光场强度系数校正和增益响应系数分开来进行校正，首先获取多幅中亮场图像并叠加取平均，去偏置误差，然后对其进行光场校正，获得校正后中亮场图，根据公式（11）和（12），此时应该是全为零值的暗场图像和校正后的中亮场图像，亮场定义为全为4095。

按如下校正流程，首先进行随机噪声去除、偏置误差校正，然后进行光场校正，再进行增益响应校正，最后为坏像素模板校正，得到下图的结果。噪声是由45降为16，降幅达到64.4%之多。

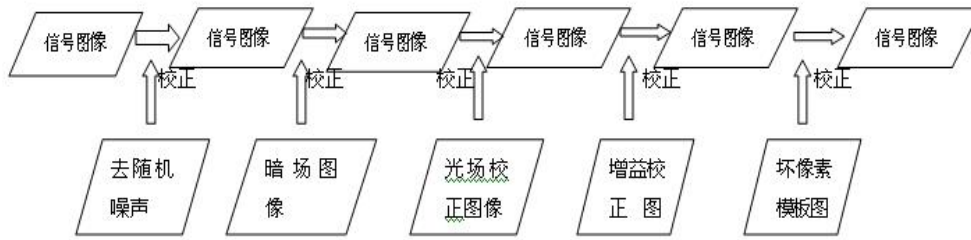


图 19 图像校正流程图

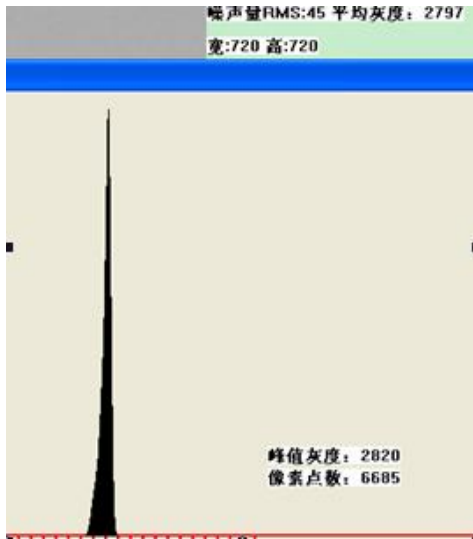


图 20 原始图像直方图及噪声标准差

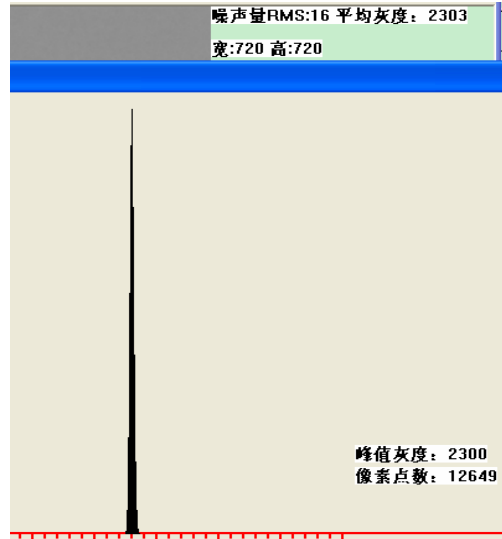


图 21 校正后的直方图及噪声标准差 (1)

但如果不进行光场校正，分别采集多幅暗场图像，中亮场图像，并叠加平均，亮场定义为全为4095。根据公式 (11) 和 (12) 进行校正。结果如下图，噪声标准差RMS由45降为16，两种方法效果基本没有差别。



图 22 校正后的直方图及噪声标准差 (2)

分析前面的公式(1)和(2): 单个像元的实际响应  $K(r)$  和像元的量子探测效率  $k_1(r)$ 、增益响应系数  $k_2(r,t)$  和光场强度系数  $k_3(r,t)$  乘性相关的, 而偏置误差是加性相关,  $k_1(r)$ 、 $k_2(r,t)$  和  $k_3(r,t)$  是很难独立分离出来的, 上面的第二种方法即是试图分离出来增益响应系数  $k_2(r,t)$  和光场强度系数  $k_3(r,t)$ , 但其实都是没有完全分离出来, 互相包含, 去噪效果甚至可能出现反而不如直接进行实际响应不一致的校正的情况, 因为直接进行实际响应不一致校正是对  $k_1(r)$ 、 $k_2(r,t)$  和  $k_3(r,t)$  的乘积的整体进行校正, 即是实际响应系数  $K(r,t)$ 。

在目前无法把像元的量子探测效率、光场强度系数和增益响应系数完全分离的情况下, 做为整体处理的话更加有效果, 即把光场校正、增益不一致校正合并为实际响应系数  $K(r,t)$  校正。上面的例子采用直线拟合曲线的方法来拟合像元灰度对平均灰度的实际响应曲线, 然后把各像元校正到平均灰度, 可采用增加分段的方法来进一步拟合, 提高去噪效果, 但考虑到需要处理400张图片, 在兼顾时间的前提下, 选择合适的分段数。本文选择3段直线拟合。原理同两段, 结果如下图: 噪声标准差降为10, 比2段略有降低, 但幅度不大, 说明再增加分段数意义不大。

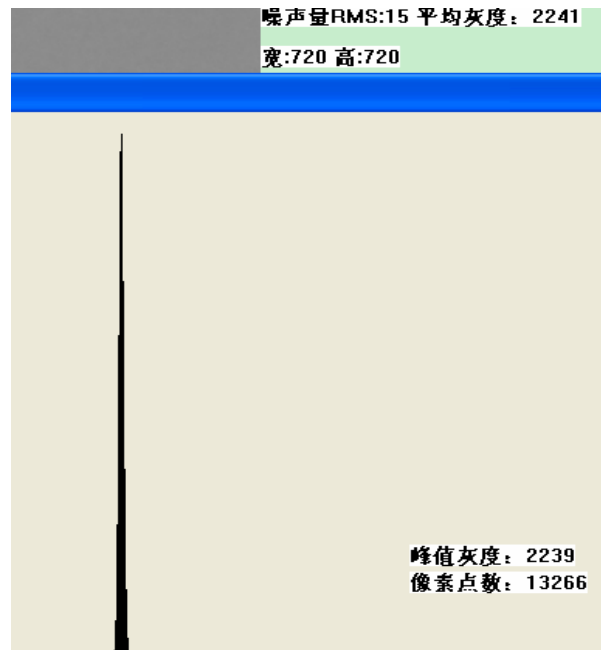


图 23 三段直线拟合校正结果图

再回过头观察(1)和(2)这两个公式, 实际上根据这两个公式, 已经将偏置误差校正、光场校正、增益不一致校正都包含在内, 这样的话, 流程图可简化为去随机噪声、响应不一致校正和坏像素模板校正。

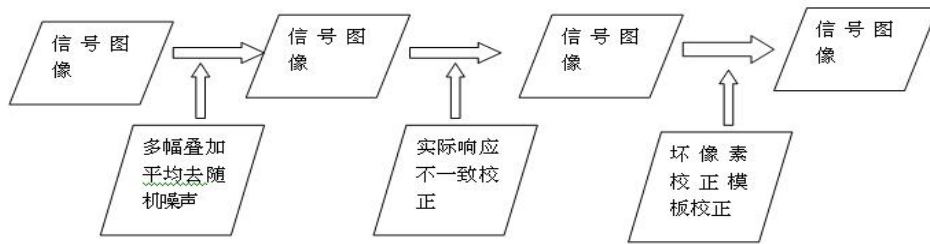


图 24 简化后的图像校正流程图

由以上分析可以看到原始均匀场图像灰度标准差为45，经响应不一致校正后灰度标准差降为16，总的降噪达到64.4%之多，取得了很好的效果。下图为用校正后的投影图像序列重建得到的断层图像，可以明显看出图像效果得到明显改善，随机噪声基本被消除，环形伪影基本消除，图像细节增多。

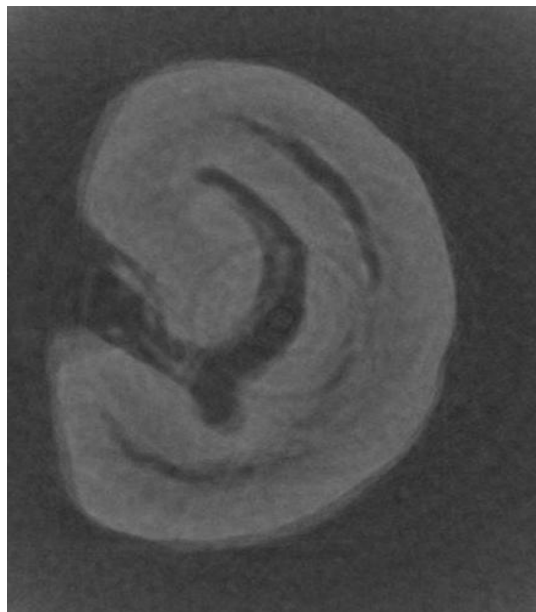


图 25 校正后的重建断层图像

## 5. 结论

本文针对探测器的性能缺陷，分别对随机噪声、暗电流、增益不一致、光场不均匀和坏像素采用多幅叠加求平均、去偏置误差、响应不一致校正、光场模板图像和坏像素模板图进行校正，取得了良好的效果。最后通过比较研究提出了一种简单实用的实际响应不一致校正，该方法结合了光场、暗电流、增益不一致校正，只一次循环就解决了三种校正，大大提高了算法效率，节省了计算时间，并用实验证明了该校正方案的有效性，提高了投影图像的质量，为后续三维重建等工作奠定了良好的基础。

## 参考文献

- [1] 刘广鹏. MicroCT 原理及应用[J]. Journal of Tissue Engineering and Reconstructive Surgery, August. 2006 Vol.2 No.4.
- [2] 周正干, 滕升华, 江巍, 安振刚. X 射线平板探测器数字成像及其图像校准[J]. 北京航空航天大学学报, 2004, 8.
- [3] 张定华, Ruola Ning, 卜昆, 毛海鹏. 体积 CT 系统中的平板探测器校正方法. 仪器仪表学报[J], 2005 年 2 月
- [4] 陈树越, 路宏年. X 射线数字成像噪声特性及噪声消除方法研究[J]. 无损检测, 2001, 23(1): 9~14
- [5] Richard L WEISFIELD, Mark A HARTNEY, Robert A STREET, et al. New amorphous-silicon image sensor for X-ray diagnostic medical imaging applications [J]. SPIE, 1998, 3336 : 444-452.
- [6] Jean Pierre MOY, B BOSSET. How does real offset and gain correction affect the DQE in images from X-ray flat detectors[J]. SPIE, 1999, 3659: 90-97.
- [7] 张丰收, 崔凤奎, 王晓强, 张定华. 平板探测器坏像素校正方法研究. [J]. 现代制造工程, 2005, 10.
- [8] 刘晓鹏. 锥束工业 CT 图像校正技术研究 [D]: [硕士学位论文]. 西北工业大学航空宇航制造工程, 2006, 3

## Elimination of the Micro CT Projective Image Noise

Dong Ge, Luo Shouhua, Wang Song, Zhang Wei

School of Biological Science and Medical Engineering, Southeast University, Nanjing (210096)

### Abstract

In order to improve the quality of the reconstructed image for the Micro CT system, this article has analyzed the forming factors of the Micro CT projective image noise: random noise, offset errors, response nonuniformity of the picture element, defect picture element and light field nonuniformity. This article has proposed the Micro CT projective image correction method to correct the random noise, dark field, light field, response nonuniformity and defect picture element and eliminate the random noise and the ring artifact. Through the comparative study, this article proposes a simple and practical correction method for the actual response nonuniformity which combines the corrections of light field, dark current and gain inconsistency and settles the three corrections with one circulation. This method has enhanced the algorithm efficiency greatly and has saved the calculation time. Through experiments the validity of this correction protocol has been proved and this method has improved the quality of the projective image and established good basis for the following work such as three-dimensional reconstruction.

**Keywords:** Micro CT projective image; image noise; image correction

**作者简介:** 董歌, 男, 1984 年生, 硕士研究生, 主要研究方向是医学信号与图像处理。