

X 射线线阵探测器校正与滤波

耿磊^{1,2}, 马潇^{1,2}, 肖志涛^{1,2}, 张芳^{1,2}, 荣锋^{1,2}, 彭晓帅^{1,2}

(1. 天津市光电检测技术与系统重点实验室, 天津 300387;
2. 天津工业大学 电子与信息工程学院, 天津 300387)

摘要: 针对 X 射线线阵探测器像素响应不均而造成 X 射线图像产生竖条纹, 以及由探测器本身和外界产生噪声干扰的问题, 提出了一种新型的校正与滤波模型, 解决了传统校正方法因忽略噪声影响而使得校正完成后数据波动较大的问题。结合 X 射线特性及 X 射线线阵探测器的成像原理, 分析了像素响应不均时的输出特性及噪声, 建立了改进的两点校正算法与基于偏微分方程的半隐式差分滤波模型。实验证明, 分辨率为 $1 \times 9 \ 216$ 的 X 射线线阵探测器在经过该模型校正后, 有效地解决了像素响应不均的问题, 抑制了噪声的影响, 在位深为 16 bit 的情况下, 平均均方误差低于五个灰度级, 提高了 X 射线图像检测的质量。

关键词: X 射线线阵探测器; 像素响应不均; 两点校正; 半隐式偏微分方程

中图分类号: TN29 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.1226001

Calibration and filtering of X-ray line array detector

Geng Lei^{1,2}, Ma Xiao^{1,2}, Xiao Zhitao^{1,2}, Zhang Fang^{1,2}, Rong Feng^{1,2}, Peng Xiaoshuai^{1,2}

(1. Tianjin Key Laboratory of Optoelectronic Detection Technology and System, Tianjin 300387, China;
2. School of Electronics and Information Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China)

Abstract: To overcome the problems of X-ray image's vertical stripes caused by uneven response of X-ray linear detector's pixels and the noise interference produced by detector and outside, a new calibration and filtering model was proposed. It solved the problem that traditional calibration result was very volatile with ignoring noise. By combining X-ray's features and X-ray linear array detector's imaging principle, the output characteristic and noise were analyzed when the pixel responded unevenly. Besides, the calibration and filtering model was built. Improved-two-point calibration algorithm was used to calibrate the image and semi implicit difference method based on partial differential equation was used to smooth the noise. Experiment results show that the unevenly response of X-ray linear array detector with a resolution of $1 \times 9 \ 216$ was eliminated, and the influence of noise was suppressed. In the case of 16 bit per pixel, the mean square error was below five gray level, it improves the quality of X-ray image detection.

Key words: X-ray linear array detector; uneven response of pixel; two-point calibration; semi implicit partial differential equation

收稿日期: 2017-04-13; 修订日期: 2017-05-20

基金项目: 国家自然科学基金(61405144); 天津市科技支撑计划重点项目(14ZCZDZX00033); 天津市科技特派员项目(15JCTPJC56300)

作者简介: 耿磊(1982-), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事测试测量技术及仪器方面的研究。Email: genglei@tjpu.edu.cn

通讯作者: 肖志涛(1971-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事图像处理与模式识别方面的研究。Email: xiaozhitao@tjpu.edu.cn

0 引言

作为无损检测技术的一种, X 射线检测技术是现代物理学、电子学、计算机科学等多学科综合应用的产物, 正以其优越的性能和特有的检测方式被广泛应用于零部件检测、轮胎检测、食品检测、安全检测等诸多领域, 尤其适用于高速在线检测的要求。X 射线成像技术^[1]中许多采用面阵探测器, 然而在一些领域中由于被测物体的面积通常比较大, 这就需要阵列的尺寸或面积越大, 其工艺要求和成本也相应提高。因此, 在一些领域中线阵探测器逐渐替代了面阵探测器。

目前, X 射线线阵探测器按 X 射线接收转换器件可以分为两类: 一类是基于线性二极管阵列(LDA)的探测器; 另一类是基于互补金属氧化物半导体(CMOS)技术的探测器。两者相比较, 后者集成度更高、电子噪声更小、功率更低、成像精度更高。当 X 射线均匀地照射到 X 射线线阵探测器上时, 各像素应该有相同的响应输出, 但是由于每个像素都有自己的偏置量和增益, 即使受均匀辐射, 输出的灰度值也有所差异, 这种现象被称作像素响应不均。由于这种现象的存在, 使得 X 射线图像会在扫描方向上出现很多条纹。造成不均匀性的原因是多种多样的, 硅材料本身的质量以及探测器的生产工艺造成的不均匀性都是无法改变的, 图像中不可避免地引入了噪声。目前, 主要的处理方法有插值法和逼近法。龚昌来等人^[2]提出了分段插值算法, 虽然校正精度较高, 但存在分段数量选择困难, 分段过多运算量相应增加, 分段过少会导致精度下降。修金利等人^[3]提出了基于响应曲线的三点分段算法, 虽然能很好地逼近响应曲线, 但需事先确定响应曲线的两个拐点, 若拐点判别错误, 整体的校正结果会出现偏差, 相对较复杂。以上方法只是针对理想情况下, 忽略了噪声的影响。根据噪声的特点和产生原因, 可分为三类: 本底噪声、随机噪声、孤立噪声。荣锋等人^[4]提出了使用差值法消除本底噪声、卡尔曼滤波法滤除随机噪声、中值滤波法消除孤立噪声, 但是需要进行多种滤波, 较为复杂, 抑制噪声的效果并不理想, 数据波动依然较大。针对以上噪声, 该课题组的肖志涛等人^[5]将偏微分方程图像处理算法应用到了基于电子散斑

干涉的无损检测中, 充分地滤除了稀疏条纹处的噪声, 同时有效保持了密集条纹处的重要特征。

针对以上问题, 提出了改进的 X 射线图像校正与滤波模型。以 X 射线点料机为背景, 介绍 CMOS 型 X 射线线阵探测器以及成像系统, 详细阐述模型的建立, 采用两点校正求感光元件的补偿偏置量因子和补偿增益因子, 使用半隐式差分格式的偏微分方程处理算法去噪。最后给出实验结果, 证明该方法可以有效地解决 X 射线线阵探测器存在的由于像素响应不均和噪声所造成的图像质量下降问题。

1 X 射线线阵探测器及成像系统

1.1 X 射线线阵探测器

X 射线线阵探测器的分辨率、动态范围和积分时间是三个重要的性能参数。

XW8804G1-160-024 是美国 X-SCAN 公司生产的一种直线型 X 射线线阵探测器, 其主要参数为: 分辨率为 0.5 mm, 动态范围 16 bit, 最小积分时间为 1 ms, 其结构^[6]如图 1 所示。

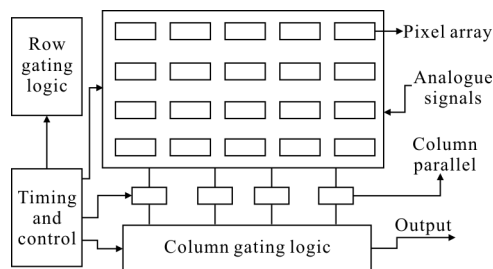


图 1 探测器的内部结构示意图

Fig.1 Internal structure of detector

1.2 成像系统

正常工作时, 由于 X 射线具有一定的辐射性, 对人体有害, 所以 X 射线光源、机械传送系统、X 射线线阵探测器安装在密闭的铅房内。X 射线光源置于顶端, X 射线线阵探测器置于下端, 机械传送系统置于两者之间。被测工件被固定在传送系统上, 这里使用传送带将被测工件以一定的速率匀速通过 X 射线扫描区域, 整体结构如图 2 所示。

当 X 射线穿透被测工件到达 X 射线线阵探测器后, 就携带了物体内部的信息, X 射线线阵探测器的感光元件是按行排列的, 对携带了物体内部信息的 X 光信号采用逐行扫描的方式对其接收, 并经过

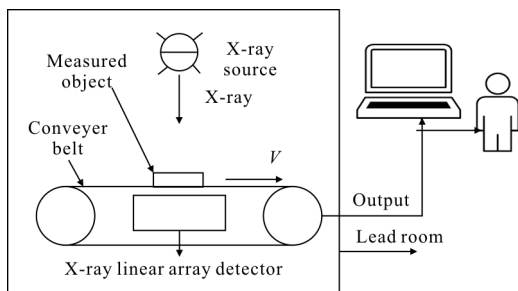


图 2 X 射线检测装置系统结构示意图

Fig.2 Structure diagram of X-ray detection system

转换器转换为电信号，该信号在标准化后经过以太网传输到计算机上，计算机将这些行数据按顺序重新排列成整幅图像。为了完整地得到图像，需要使被测工件通过 X 射线成像区域的速度与 X 射线线阵探测器的积分时间相一致，即传送带的速度与 X 射线线阵探测器的扫描速度相匹配，应符合公式(1)：

$$V = \frac{D \times N}{T(s) \times M} \quad (1)$$

式中： V 为传送带移动速度， mm/s ； D 为像素间隔； N 为像素合并个数； T 为积分时间； M 为放大倍数。由于 X 射线线阵探测器的接收区域为一条狭长的细缝，需要调整角度和位置，使 X 射线光源、被测物体及 X 射线线阵探测器的接收区域在一条直线上，即可得到较完整的图像。

2 图像质量下降的原因分析

X 射线是由高速运动的电子撞击金属靶后，带电粒子急剧减速，将电子的部分动能转变为电磁能，以光量子的形式释放出来。市场上的 X 射线光源基本都是点光源，因此当 X 射线发射出来后，会以散状的形式散射到周围，X 射线线阵探测器上的感光元件点并不能接收到均匀的 X 射线，又由于每个感光元件点都有自己的偏置量和增益，即使受光均匀，各像素点之间的响应也有所差异，这种物理现象叫做像素响应不均。并且在接收光电子进行统计起伏时容易引入噪声，使得图像质量大大下降。

该 X 射线线阵探测器共有 9 216 个像素点，位深 16 bit，理想情况下，在有 X 射线时，各像素点的灰度值应为 0，如图 3 所示，在实际情况下，像素点的灰度值如图 4 所示，整幅工件图像如图 5 所示。

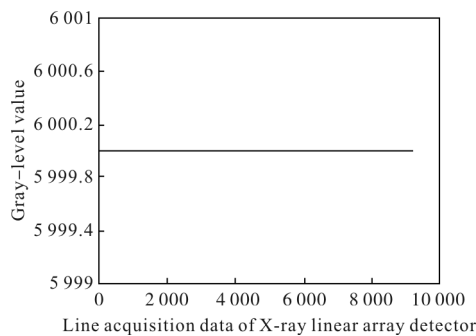


图 3 理想状态下 X 射线行数据

Fig.3 Line data with X-ray in ideal state

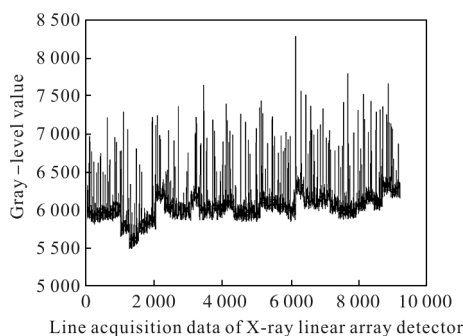


图 4 实际情况下扫描数据

Fig.4 Line scan data in actual cases

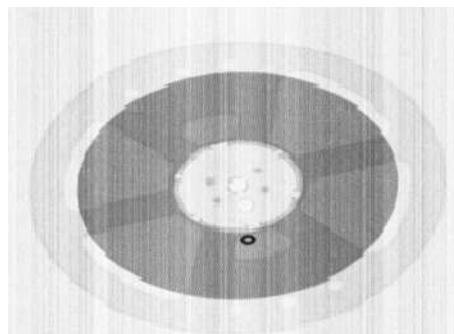


图 5 未校正且有高斯噪声的 X 射线图像

Fig.5 X-ray image with Gaussian noise and without calibration

从图 5 中可以看出，由于 X 射线线阵探测器自身的问题，使得图像失真严重，在图像中存在明显的竖条纹和噪声。

3 校正与滤波模型建立

3.1 两点校正

研究表明，在一定程度范围内，当 X 射线发射后，X 射线线阵探测器内的感光器件对 X 射线的响应变化率可以近似地看作是线性变化^[7]。由于每个

感光元件的偏置量和增益不同,造成对于接收同样大小能量的像素,其响应输出量不同,因此,对于 X 射线图像校正的实质就是对像素点的响应率偏置因子和增益因子进行修正。

假设每个 X 射线感光元件的响应满足公式(2):

$$Y_i(\varphi)=K_i \times \varphi+B_i \quad \{i \in [1, N]\} \quad (2)$$

式中: Y_i 为第 i 个 X 射线感光元件的输出信号; K_i 为第 i 个感光元件的增益因子; φ 为第 i 个感光元件接收到的 X 射线的光能量; B_i 为第 i 个感光元件的偏置因子; N 为 X 射线线阵探测器的感光元件个数。

两点校正的目的是使每个感光元件在接收到相同大小 X 射线能量的时候,也输出一样大小的输出信号^[8],输出满足公式(3):

$$O(\varphi)=Z_i \times Y_i(\varphi)+P_i \quad \{i \in [1, N]\} \quad (3)$$

式中: $O(\varphi)$ 为经过两点校正后的输出信号; Z_i 为增益校正因子; P_i 为偏置校正因子。经过两点校正后,满足:

$$Y_i(\varphi)=Y_j(\varphi) \quad \{i, j \in [1, N], i \neq j\} \quad (4)$$

由公式(3)可知,若想使得感光元件的输出得以校正,每个感光元件只需代入两次不同大小的 X 射线能量,即每个点代入两次不同的 φ 值。既可以对感光元件响应的偏置量因子做补偿,也可以对增益因子做补偿。

选择两个定标点 φ_1 和 φ_2 , φ_1 为关闭 X 射线光源时接收的能量, φ_2 为不放被测工件的情况下打开 X 射线光源时接收的能量,选择电压为 80 kV, 电流为 0.3 mA, 即: $\varphi_1=0$ W, $\varphi_2=30$ W。具体步骤如下:

第一步,关闭 X 射线光源,即在 φ_1 条件下连续采集 M 行数据,求出该样本下感光元件的输出信号样本均值,即:

$$\overline{Y_i(\varphi_1)}=\frac{\sum_{j=1}^M Y_{ij}(\varphi_1)}{M} \quad \{i \in [1, N]\} \quad (5)$$

式中: $\overline{Y_i(\varphi_1)}$ 为在接收 X 射线能量为 φ_1 时第 i 个感光元件在样本容量为 M 下求取的输出信号的均值; $Y_{ij}(\varphi_1)$ 为在接收 X 射线能量为 φ_1 时第 i 个感光元件在样本容量为 M 下第 j 次的输出信号。

第二步,打开 X 射线光源,在 φ_2 ($\varphi_1=0$ W, $\varphi_2=30$ W) 条件下连续采集 M 行数据,求出该样本下感光元件的输出信号样本均值,即:

$$\overline{Y_i(\varphi_2)}=\frac{\sum_{j=1}^M Y_{ij}(\varphi_2)}{M} \quad \{i \in [1, N]\} \quad (6)$$

式中: $\overline{Y_i(\varphi_2)}$ 为在接收 X 射线能量为 φ_2 时第 i 个感光元件在样本容量为 M 下求取的输出信号的均值; $Y_{ij}(\varphi_2)$ 为在接收 X 射线能量为 φ_2 时第 i 个感光元件在样本容量为 M 下第 j 次的输出信号。

第三步,将所有感光元件的平均输出信号的期望作为目标输出信号,即:

$$\begin{cases} O(\varphi_1)=\frac{\sum_{i=1}^N \overline{Y_i(\varphi_1)}}{N} \\ O(\varphi_2)=\frac{\sum_{i=1}^N \overline{Y_i(\varphi_2)}}{N} \end{cases} \quad (7)$$

令 $Y_i(\varphi_1)=\overline{Y_i(\varphi_1)}$, $Y_i(\varphi_2)=\overline{Y_i(\varphi_2)}$, 代入公式(3)中:

$$\begin{cases} O(\varphi_1)=Z_i \times Y_i(\varphi_1)+P_i \\ O(\varphi_2)=Z_i \times Y_i(\varphi_2)+P_i \end{cases} \quad \{i \in [1, N]\} \quad (8)$$

解此方程组可得:

$$\begin{cases} Z_i=\frac{O(\varphi_1)-O(\varphi_2)}{Y_i(\varphi_1)-Y_i(\varphi_2)} \\ P_i=\frac{Y_i(\varphi_1) \times O(\varphi_2)-Y_i(\varphi_2) \times O(\varphi_1)}{Y_i(\varphi_1)-Y_i(\varphi_2)} \end{cases} \quad (9)$$

将公式(5)、(6)代入到公式(9)中,推导出每个感光元件的偏置量因子和增益因子:

$$\begin{cases} Z_i=\frac{\sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N [Y_{ij}(\varphi_1)-Y_{ij}(\varphi_2)]}{N \times \sum_{j=1}^M [Y_{ij}(\varphi_1)-Y_{ij}(\varphi_2)]} \\ P_i=\frac{\sum_{j=1}^M Y_{ij}(\varphi_1) \left[\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M Y_{ij}(\varphi_2) \right] - \sum_{j=1}^M Y_{ij}(\varphi_2) \left[\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M Y_{ij}(\varphi_1) \right]}{M \times N \times \sum_{j=1}^M [Y_{ij}(\varphi_1)-Y_{ij}(\varphi_2)]} \end{cases} \quad (10)$$

公式(10)推导出了每个感光元件进行校正时所需的补偿偏置量因子和补偿增益因子。当开始正常工作时, X 射线线阵探测器每扫描输出一行数据后,根据公式(3)和公式(10)中求出的补偿因子即可进行校正。

3.2 偏微分方程的半隐式差分法

设 $I:R^2 \rightarrow R$ 代表一幅灰度图像,其中 $I(x,y)$ 是像素点 (x,y) 处的灰度值。引入时间参数 t , 则图像演化过程可以表示如下:

$$\partial_t u=F[u(x,y,t)], u(x,y,0)=I(x,y) \quad (11)$$

式中: $\partial_t u$ 为图像 u 对时间 t 的一阶导数; F 为针对不

同的图像处理过程所给出的偏微分算子, 原始图像 I 可看作初始条件。这样, 此微分方程的解 $u(x,y,t)$ 就是在时间参数 t 下处理后的图像, 这就是偏微分方程的思想^[8]。

由于热传导方程各向同性线性扩散所产生的缺点, 即使会使图像边缘模糊, 为了达到去噪同时保护图像边缘信息的目的, Perona 和 Malik 提出 P-M 方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial u(x,y,t)}{\partial t} = \text{div}[g(|\nabla u|)\nabla u] \\ u(x,y,0) = I(x,y) \end{cases} \quad (12)$$

式中: div 为散度算子; ∇ 为梯度算子; $I(x,y)$ 为原始图像; $g(|\nabla u|)$ 为一个平滑的非增函数, 称为扩散系数。

由于 P-M 方程所得到的图像平滑是有条件的, 在有些情况下, 方程的解是不稳定的。为此, 对 P-M 方程正则化^[9]:

$$\begin{cases} \frac{\partial u(x,y,t)}{\partial t} = \text{div}[g(|\nabla G_\sigma \times u|)\nabla u] \\ u(x,y,0) = I(x,y) \end{cases} \quad (13)$$

式中: G_σ 为方差为 σ 的高斯函数。此方程保证了非线性扩散是稳定的, 存在唯一的连续依赖于初值 $I(x,y)$ 的解。

半隐式差分格式所得到的方程组是线性的, 这就使得数值计算比非线性方程组简单了许多, 并且也是绝对稳定的。采用由 Weickert 等提出的半隐式方案:

$$u_s^{n+1} = u_s^n + \Delta t \sum_{p \in \Gamma_s} \frac{g_p^n + g_s^n}{2} (u_p^{n+1} - u_s^{n+1}) \quad (14)$$

式中: 下标 s, p 以及 Γ 的含义如图 6 所示, p_1, p_2, p_3, p_4 是 s 的四邻点, Γ 表示以 s 为中心的四邻点集合。

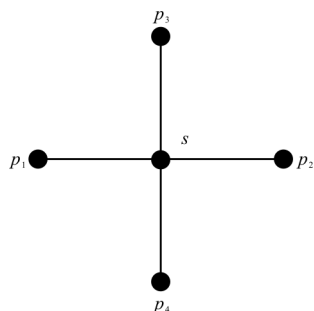


图 6 四邻点集合

Fig.6 Four-points neighborhood set

此外,

$$g_p^n := g(|\nabla u_s^n \times G_\sigma|) \quad (15)$$

g 的代数表达式^[10]即边缘函数采用下面的形式:

$$g(r) = 1 - \exp\left[-3.315 \left(\frac{r}{k}\right)^8\right] \quad (16)$$

其中, k 是可调参数, 又称反差参数, 可以控制 g 随 r 变化速度的快慢。将公式(14)的具体半隐式格式表示如下:

$$\begin{aligned} u_{i,j}^{n+1} = & u_{i,j}^n + \tau \cdot \left[\frac{g_{i-1,j}^n + g_{i,j}^n}{2} \right] \cdot (u_{i-1,j}^{n+1} - u_{i,j}^{n+1}) + \\ & \frac{g_{i+1,j}^n + g_{i,j}^n}{2} \cdot (u_{i+1,j}^{n+1} - u_{i,j}^{n+1}) + \\ & \frac{g_{i,j-1}^n + g_{i,j}^n}{2} \cdot (u_{i,j-1}^{n+1} - u_{i,j}^{n+1}) + \\ & \frac{g_{i,j+1}^n + g_{i,j}^n}{2} \cdot (u_{i,j+1}^{n+1} - u_{i,j}^{n+1}) \end{aligned} \quad (17)$$

式中: τ 为时间步长, g 采用“半点”离散格式^[10], 即用在 n 层数据两个相邻整点值来求平均值, 得到的结果来近似它在“半点”上的值, 表示如下:

$$\begin{cases} g_{i,j+\frac{1}{2}} \approx (g_{i,j+1} + g_{i,j})/2 \\ g_{i,j-\frac{1}{2}} \approx (g_{i,j-1} + g_{i,j})/2 \\ g_{i+\frac{1}{2},j} \approx (g_{i+1,j} + g_{i,j})/2 \\ g_{i-\frac{1}{2},j} \approx (g_{i-1,j} + g_{i,j})/2 \end{cases} \quad (18)$$

用矩阵形式表示如下:

$$u^{n+1} = u^n + \tau \cdot A^n \cdot u^n \quad (19)$$

进一步推导:

$$u^{n+1} = (I - \tau \cdot A^n)^{-1} u^n \quad (20)$$

式中: u^{n+1} 和 u^n 表示在 $n+1$ 和 n 时刻的图像矢量, 是 $M \times N$ 维列矢量; A^n 表示 $MN \times MN$ 维矩阵; I 表示 $MN \times MN$ 维单位矩阵。矩阵 A^n 的元素:

$$a_{s,p} = \begin{cases} (g_s^n + g_p^n)/2 & p \in \Gamma_s \\ -\sum_{k \in \Gamma_s} (g_s^n + g_k^n)/2 & p = s \end{cases} \quad (21)$$

其他的元素均为 0, 可见 A^n 是稀疏矩阵, 但并不是三对角的。由于系数矩阵太大, 这就给求逆矩阵带来很大的困难, 为了克服缺点, Weickert 提出了加性算子分裂(Additional Operator Splitting, 简称 AOS)算法。

将一次迭代分为两个子步骤,首先对 u^n 的行和列各作一维扩散,得到两个中间结果 u_1^{n+1} 和 u_2^{n+1} ,即

$$\begin{cases} u_1^{n+1} = (I - 2\tau \cdot A_x^n)^{-1} u^n \\ u_2^{n+1} = (I - 2\tau \cdot A_y^n)^{-1} u^n \end{cases} \quad (22)$$

然后对 u_1^{n+1} 和 u_2^{n+1} 求平均值完成一次完整的迭代^[11]。即

$$u^{n+1} = \frac{1}{2} (u_1^{n+1} + u_2^{n+1}) \quad (23)$$

进一步推导得:

$$u^{n+1} = \frac{1}{2} \left[(I - 2\tau \cdot A_x^n)^{-1} + (I - 2\tau \cdot A_y^n)^{-1} \right] u^n \quad (24)$$

完成 u^n 后,做如下操作:

第一步,令 $f_{ij} = u_{ij}^n$;

第二步,计算 $f_{\sigma} = f \times G_{\sigma}$, $|\nabla f_{\sigma}|_{ij}$, $g_{ij}^n = g(|\nabla f_{\sigma}|_{ij})$;

第三步,对 $i=1, \dots, M$

(1) 计算 $(I - 2\tau \cdot A_{x,i}^n)$ 的三个对角线上的元素: $(\alpha_k^{(i)}, k=1, \dots, N), (\beta_k^{(i)}, k=1, \dots, N-1), (\gamma_k^{(i)}, k=2, \dots, N)$;

(2) 一般采用 Thomas 算法求解 $(I - 2\tau \cdot A_{x,i}^n) u_{1i}^{n+1} = u_{1i}^n$, $i=1, \dots, M$, 得到 u_1^{n+1} ;

第四步,对于 $j=1, \dots, N$,

(1) 计算 $(I - 2\tau \cdot A_{y,j}^n)$ 的三个对角线元素;

(2) 一般采用 Thomas 算法求解 $(I - 2\tau \cdot A_{y,j}^n) u_{2j}^{n+1} = u_{2j}^n$, $j=1, \dots, N$, 得到 u_2^{n+1} ;

第五步,计算 $u^{n+1} = \frac{1}{2} (u_1^{n+1} + u_2^{n+1})$ 。

这就完成了一次完整的迭代。

4 实验结果分析

根据上述建立的模型进行求解, XW8804G1-160-024 型 X 射线线阵探测器共有 9 216 个感光元件,在关闭 X 射线光源和打开 X 射线光源(电压为 80 kV, 电流为 0.3 mA)两种情况下各连续采集 50 行数据,即 $N=9\ 216, M=50, \varphi_1=0\ W, \varphi_2=30\ W$, 将获取得到的数据 $Y_{ij}(\varphi_1)$ 和 $Y_{ij}(\varphi_2)$, 其中 $\{i \in [1, N], j \in [1, M]\}$, 以及参数组(11)代入到模型中进行求解, 解出 Z_i 和 P_i 后进行存储, 当正常工作进行扫描工件时, 对采集到的数据根据公式(3)进行变换。开启 X 射线光源后采集

的未经处理的扫描数据和经过该基于两点校正变换后的数据分别如图 7 和图 8 所示。

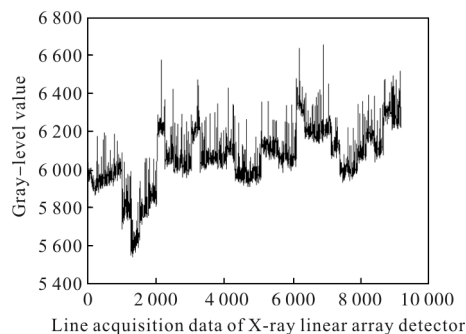


图 7 未校正的 X 射线行扫描数据

Fig.7 X-ray line scan data without calibration

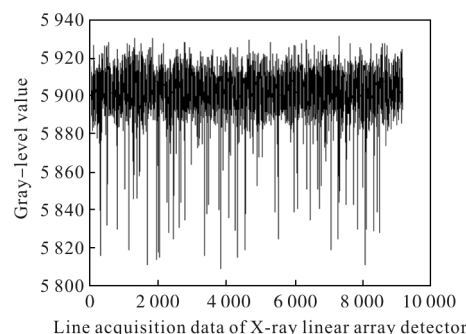


图 8 经过两点校正后的 X 射线图像

Fig.8 X-ray image with two-points calibration

由图 8 可见, 图像在经过两点校正后数据波动大, 仍存在大量的噪声。对一行数据去噪时, 可连续采集多行数据进行处理, 这里使用 RN 表示对连续 N 行数据处理的结果作为该行的输出。为了验证三种算法的优劣以及与 RN 的关系, 分别连续采集 50、100、150、200、250、300 行数据进行测试, 结果如表 1 所示, 根据测量结果绘制 SN 与 MMSE 的关系

表 1 连续采集 N 行数据进行处理

Tab.1 Result of continuous collection of N line data

MMSE	MF	KF	AOS
50	10.8	7.0	4.5
100	9.6	6.8	3.9
150	8.9	6.8	3.2
200	8.4	6.7	2.6
250	7.8	6.5	2.4
300	7.2	6.6	2.4

图,如图 9 所示。其中 MF 表示均值滤波,KF 表示卡尔曼滤波,AOS 表示半隐式差分格式的偏微分方程算法,MMSE 表示平均均方误差,单位为位深 16 bit 的灰度级。

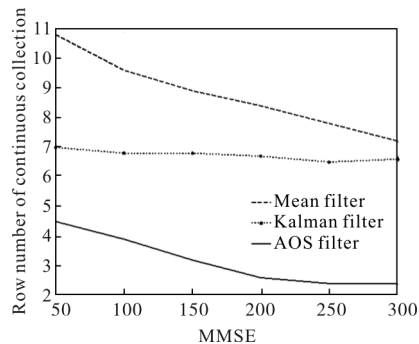


图 9 不同行数处理结果

Fig.9 Result of different row number

由表 1 可知,不同的 RN 条件下,AOS 算法的 MMSE 最小,KF 算法次之,MF 算法的 MMSE 最大。由图 9 可知,三种算法的 MMSE 均呈下降趋势,即 RN 变大的同时,MMSE 都会相应地减小,说明 RN 越大去噪效果越好。物料盘置于传送带上,传送带的速度为 0.05 m/s,探测器采集速率为 9 000 lines/s,为了匹配探测器的采集速度,且由表 1 和图 9 可知在 RN=300 时,滤波效果最佳,平衡采集速度和滤波效果,选取 RN=300,此时,三种算法滤波效果如图 10 所示。图 10(a)为均值滤波,图 10(b)为卡尔曼滤波,图 10(c)为 AOS 算法滤波。

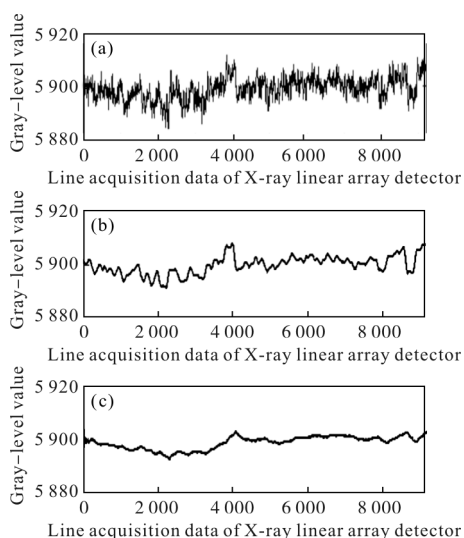


图 10 几种滤波方法的比较

Fig.10 Comparison of several filtering methods

针对以上三种方法,在 RN=300 的条件下选取光源功率分别为 0、24、27 W 下的第 10、50 行的数据进行比较,结果如表 2 所示,其中 MV 表示测量值。

表 2 不同光源功率下测量结果

Tab.2 Results under different source power

Power/W		MF		KF		AOS	
		L1	L2	L1	L2	L1	L2
0	MV	13	12	6	5	1	1
	MMSE	7.5	7.4	6.4	6.7	2.5	2.4
24	MV	6 038	6 035	6 042	6 046	6 052	6 053
	MMSE	8.2	8.6	6.8	7.4	3.3	3.4
27	MV	7 047	7 014	7 035	7 037	7 033	7 032
	MMSE	8.8	8.5	7.6	7.7	4.2	4.5

由图 10 可以看出,MF 算法处理后的数据曲线较为陡峭、毛刺较多,AOS 算法和 KF 算法处理后的数据曲线较为平滑。表 2 中在光源功率分别为 0、24、27 W 的情况下,AOS 算法的 MMSE 均小于五个灰度级,小于其他两种算法,由此可以证明 AOS 算法可更好地抑制噪声。AOS 滤波后的图像如图 11 所示,比较完整、清晰地再现了被测件的内部结构。

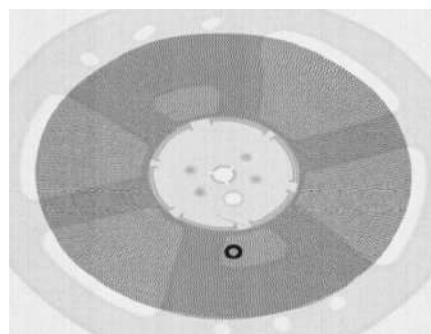


图 11 经过模型处理后的 X 射线图像

Fig.11 X-ray image after dealing with the model

5 结论

分析了 X 射线线阵探测器的结构以及成像系统,由于探测器内部的各感光元件的偏置量因子和增益因子不同而导致在其接收到相同的 X 射线能量后输出信号不同,使得图像中产生大量竖条纹,同时携带大量噪声,导致图像质量下降,失真严重。提出了一种校正、滤波模型,改进的两点校正算法

可快速地求解出图像的补偿偏置量因子和补偿增益因子, 偏微分方程的半隐式差分滤波方法保护图像的边缘并平滑了图像。实验证明, 该模型解决了像素响应不均的问题, 抑制了噪声的影响, 提高了 X 射线线阵探测器的成像质量, 在图像位深为 16 bit 的情况下, 像素响应输出数据的平均均方误差低于五个灰度级, 适合 X 射线线阵探测器的应用。

参考文献:

- [1] Liu Lifeng, Xiao Shali, Qian Jiayu. A spherically bent crystal analyzer for X-ray backlighting imaging diagnosis[J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2015, 26(3): 439-443. (in Chinese)
刘利锋, 肖沙里, 钱家渝. X 射线背光成像诊断的球面晶体分析器研究[J]. 光电子·激光, 2015, 26(3): 439-443.
- [2] Gong Changlai, Luo Cong, Yang Dongtao, et al. Infrared image magnification algorithm based on linear interpolation and sine gray level transformation [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2013, 40(2):110-114. (in Chinese)
龚昌来, 罗聪, 杨冬涛, 等. 基于线性插值和正弦灰度变换的红外图像放大[J]. 光电工程, 2013, 40(2): 110-114.
- [3] Xiu Jinli, Jin Weiqi, Liu Chongliang, et al. Three-point infrared radiometric calibration and correction method using U-shaped blackbody [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(9): 2313-2318. (in Chinese)
修金利, 金伟其, 刘崇亮, 等. 应用 U 形边框黑体光阑的三点辐射定标校正方法及其分析 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(9): 2313-2318.
- [4] Rong Feng, Miao Changyun, Xu Wei. High-speed X-ray linear array detector noise analysis and filtering method [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2013, 40(8): 64-72. (in Chinese)
荣锋, 苗长云, 徐伟. 高速 X 射线线阵探测器噪声分析与滤波方法[J]. 光电工程, 2013, 40(8): 64-72.
- [5] Xiao Zhitao, Yuan Quan, Zhang Fang, et al. The oriented partial differential equation based on the discontinuities measure for electronic speckle pattern interferometry [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(11): 2600-2606. (in Chinese)
肖志涛, 袁泉, 张芳, 等. 结合非连续性测度的方向偏微分方程在电子散斑干涉中的应用[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(11): 2600-2606.
- [6] Yi Longtao, Sun Tianxi, Wang Kai, et al. Design of an X-ray detecting system based on square polycapillary X-ray lens [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(S1): S117001. (in Chinese)
易龙涛, 孙天希, 王锴, 等. 一种基于方形多毛细管透镜的 X 射线探测系统设计 [J]. 红外与激光工程, 2016, 45(S1): S117001.
- [7] Yang Min, Chen Hao, Meng Fanyong, et al. Novel correction method for X-ray beam energy fluctuation of high energy DR system with a linear detector[J]. *Chinese Physics C*, 2011, 35(11): 1074-1078.
- [8] Shi W M, Yang X D. Research on Improvement of INS Two-Point Calibration in Horizontal Damping State [M]. Paris: Atlantis Press, 2016.
- [9] Qian Weixin, Wang Wanli, Qi Shuangxi, et al. Generalized variation-based regularization method for infrared image denoising [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(1): 67-71. (in Chinese)
钱伟新, 王婉丽, 祁双喜, 等. 基于广义变分正则化的红外图像噪声抑制方法[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(1): 67-71.
- [10] Xiao Zhitao, Feng Tiejun, Zhang Fang, et al. Image interpolation with corner preserving based on partial differential equation [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(8): 1892-1899. (in Chinese)
肖志涛, 冯铁君, 张芳, 等. 基于角点保护的偏微分方程图像插值方法[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(8): 1892-1899.
- [11] Xiao Zhitao, Yuan Quan, Zhang Fang, et al. Consistency proof of two denoising methods and the parameter selection of PDE filtering method for ESPI[J]. *Chinese Optics Letters*, 2013, 11(12): 33-38.