

射线面阵探测器成像系统校正研究*

梁丽红 路宏年

(北京航空航天大学机械与自动化学院,北京 100083)

摘要 基于线性、移不变理论,对射线面阵探测器成像的特性和系统成像所呈现出亮度不均匀的原因进行分析研究.通过分析线性系统成立的假设条件,给出了对实际成像中各像元点阵的偏置、灵敏度进行逐点校正的公式.在实验室,对基于 PaxScan2520 面阵探测器的成像系统进行成像校正研究,取得了满意的效果,噪声得到有效的抑制,成像的不一致性得到改善.当检测较厚工件或工件厚度变化较大时,系统成像超出其线性范围,给出了二次校正的方法和公式,也取得了满意的效果.

关键词 射线成像;面阵探测器;不一致性;校正;偏置;灵敏度

中图分类号 TP391, TN911.72

文献标识码 A

0 引言

基于非晶硅(amorphous silicon-a-Si)探测器的检测技术是近年来迅速发展起来的先进的射线无损检测技术^[1],它是一种基于非晶硅(a-Si)光电二极管的射线探测器,同一般的微光成像器件一样,是一种以光、电子累积的方式成像.包括三部分:一是亚毫米级厚度的闪烁体膜,材料一般为 Gd_2O_2S 或 CsI;二是与闪烁体膜直接耦合的大规模集成的光电二极管阵列;三是探元读出、A/D 转换和放大电路.它具有许多优点,诸如:高的灵敏度,较大的动态范围;大的成像面积^[2,3];克服了基于 CCD 的射线面阵成像系统中,利用多个 CCD 组成传感器,虽然提高成像面积,但还存在边缘几何畸变的问题^[4].

非晶硅面阵探测器成像系统同大多数探测器一样,都非完全线性的理想系统,为处理方便,将输入、输出的卷积关系简化成一种简单的直线方程.本文旨在依据线性、移不变理论^[5,6],通过分析简化成立的条件,得到对系统成像进行校正的依据和方法,并应用于工程实践中.

1 系统校正的原因

数字射线成像技术要求成像中的各点具有相同的响应特性^[7],同各种大规模集成的光电器件(如 CCD)一样,非晶硅数字 X 射线面阵探测器(如 PaxScan2520)的成像质量受到像元输出通道光电转换特性和输出放大电路的不一致性制约.不一致性主要是指探测器结构所固有的,包括闪烁体材料特性不一致性、像元响应的不一致性(闪烁体转换射线光

子为可见光光子效率和二极管转换可见光光电特性不同)和放大器响应的不一致性.在均匀辐照均质工件(或空屏)的条件下,由于这种不一致性的影响,致使输出图像亮度呈规整的非均匀性(见图1).

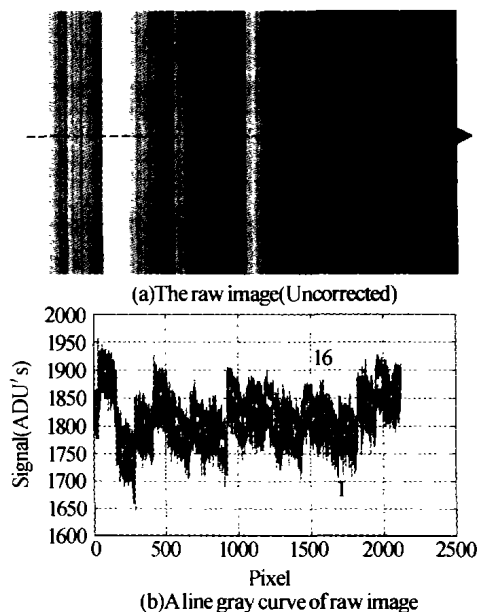


图1 未经任何校正得到的原始图像及灰度曲线
Fig. 1 The raw image and gray curve

从图1可以看出,多幅叠加后图像其中一行的标准差下降幅度很小,因此认为此时系统主要受不一致性的影响,由于它们是像元固有特性,从理论上可以校正.问题是用什么方法,在何种程度上,方可得到有效的校正.解决这个问题在很大程度上取决于对像元不一致性分析.由于影响成像质量的因素较多,精确研究像元绝对不一致性,以求达到千分之几量级是很困难的,事实上像元不一致性主要影响的是图像细节分辨率,因此,我们关心的是相对于图像分辨率而言的探测器像元不一致性,即相对不一致性.

*国家自然科学基金项目(60172014)

Tel:010-82317867 Email:guolyz@sohu.com

收稿日期:2003-09-16

2 系统校正理论及方法

2.1 线性移不变成立的假设条件

面阵探测器的成像是由每个像元的成像组成的,因此校正是对每个像元逐点进行的.

1)就每个像元而言,受输入的影响其响应在时间上具有一定的随机性,但工作模式、帧频一定,且探测器处于热稳态时,像元的响应在空间上不变的,因此研究的探测器成像特性满足移不变性;

2)每个像元的零输入响应特性主要是由暗电流引起的,与暗电流大小、积分时间成线性;

3)X射线是多能谱分布的,零状态响应是对不同能谱射线的响应,因此与不同能谱射线强度成线性.

根据动态测试系统理论,假设面阵板探测器成像系统满足上述条件,具有线性移不变性,则其输出为

$$I_o(x, y) = \text{零输入响应 } B(x, y) + \text{零状态响应 } R(x, y) \quad (1)$$

当 $B(x, y) \approx 0$ 或可经过校准使其趋于零,就可以通过实际测得的输出 $I_o(x, y)$ 来逆求输入 $I_i(x, y)$. 因此,系统的校正从这两方面进行.

2.2 偏置校正

从式(1)不难看出,由于零输入响应的存在,使得探测器输出 $R(x, y)$ 产生了 $B(x, y)$ 的偏置. 这种偏置一方面缩小了探测器输出的动态范围;另一方面由于每个像元的 $B(x, y)$ 各不一样,又造成了输出图像不能很好地再现输入的射线场强. 显然零输入响应是探测器的一种固有特性,将其称作偏置特性.

偏置(暗电流不一致性)校正,主要是除去与输出电路中放大器相关的 DC 分量和暗电流. 偏置特性与输入无关,因此,利用原始采集的图像减去经多幅叠加的背景图像得到^[5-7]. 校正公式为

$$I_B(x_i, y_i) = I_r(x_i, y_i) - B(x_i, y_i) \quad (2)$$

式中 $I_r(x_i, y_i)$ 为在一定曝光时间和射线剂量下,采集的原始图像;

$B(x_i, y_i)$ 为在同样曝光时间、无射线辐射情况下,采集的多幅叠加平均的图像,即暗场基准图像.

2.3 灵敏度校正

对于已设定工作参数的探测器,当零输入响应 $D(x, y) = 0$ 时,对射线输入场强的响应,称作探测器在该种工作状态下的零状态响应. 依此定义,由式(1)有

$$R(x, y) = I_o(x, y) - B(x, y) \approx I_o(x, y) \quad (3)$$

设成像系统的点扩展函数(point-spread-function PSF)为 $h(x, y)$, 则射线到达探测器,在被光敏元件采样之前对输入射线场强的零状态响应为

$$R(x, y) = I_i(x, y) * h(x, y) =$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} I_i(x - \alpha, y - \beta) h(\alpha, \beta) d\alpha d\beta \quad (4)$$

经模拟和实验验证,此时的 PSF 近似为高斯函数

$$h(x - \alpha, y - \beta) = A \exp \left[\frac{(x - \alpha)^2 + (y - \beta)^2}{(BW_d/2)^2} \ln 2 \right] \quad (5)$$

式中 $BW_d = \sqrt{d^2 + [a(M-1)]^2}$ 为 PSF 的半波宽; d 为像元尺寸, a 为射线焦斑直径, M 为放大比.

以幅值为 $S'(x, y)$, 直径为 BW_d 的小圆柱,对高斯函数场强等效,则式(4)简化为:

$$R(x, y) = I_i(x, y) * h(x, y) = I_i(x, y) \times \left(\frac{\pi}{4} BW_d^2 \right) S'(x, y) = I_i(x, y) \times S(x, y) \quad (6)$$

此时式中的射线场强满足以下条件

$$I_i(x - \alpha, y - \beta) = \begin{cases} I_i(x, y) & |\alpha|, |\beta| < BW_d/2 \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (7)$$

$S(x, y)$ 即为探测器的灵敏度. 上述卷积退化成代数方程是以牺牲成像系统的分辨率为代价的,即系统的 PSF 以圆柱函数对其高斯函数分布作了简化.

由于面阵探测器是由像元点阵构成的,最后的成像还受像素的点阵间距 s (采样频率)和光敏面积(采样孔径 d) 制约,即宽度为 d 的脉冲与周期为 s 的冲击函数的卷积,致使成像系统的最小分辨率受限.

经过上述的假设分析和简化,射线的输入场强可以用下式来估计

$$\hat{I}_i(x, y) = R(x, y) / S(x, y) = (I_o(x, y) - B(x, y)) / S(x, y)$$

经灵敏度校正后的图像可由下式得到

$$I_g(x_i, y_i) = K \times \frac{I_B(x_i, y_i)}{G(x_i, y_i) - B(x_i, y_i)} \quad (8)$$

式中 $G(x_i, y_i)$ 为灵敏度基准图像; K 为 $G(x_i, y_i)$ 经偏置校正后的归一化因子.

2.4 校正结果

通过上面的分析,对 PaxScan2520 面阵探测器成像系统的不一致性进行校正.

图2为经过偏置和灵敏度校正后的输出图像. 采集校正图像的输入条件与采集灵敏度基准图像条件一致,射线场内无工件. 从图2可以看出,多幅叠加后图像其中一行的标准差下降幅度很大,说明对系统进行校正后,不一致性得到了很好的抑制,此时随机噪声成为影响成像质量的主要原因,并可通过多幅叠加来降低.

图3为对工件进行检测的背景图像. 从图中可以看出,当图像背景灰度接近饱和时,不一致性校正不完全. 针对这种情况,需要对图像进行二次校正.

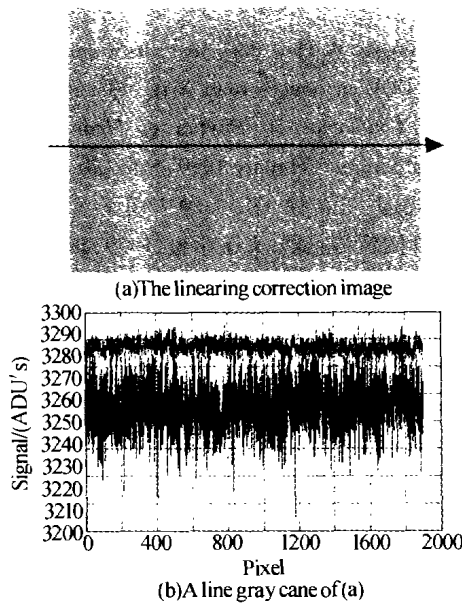


图 2 校正后得到的图像及灰度曲线图
Fig. 2 The corrected image and gray curve

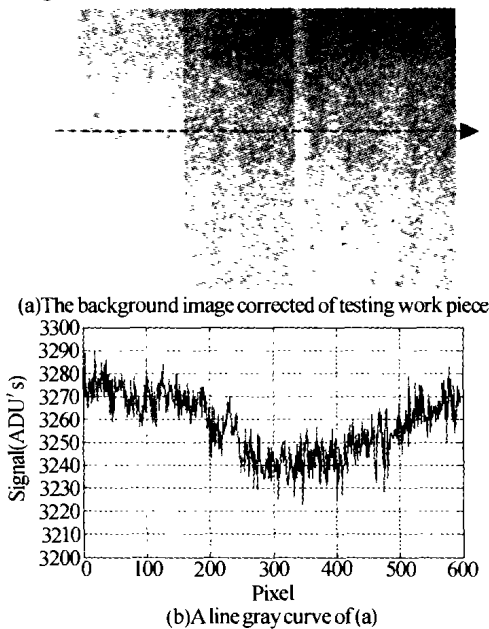


图 3 工件检测时的背景图像及灰度曲线图
Fig. 3 The background image and its curve of testing work piece

3 二次校正

采集工件图像出现不一致性的原因分析:上述对图像校正及校正后的一些分析,均是对在无工件情况下采集的空屏图像进行的分析处理.此时采集图像的输入射线能量与采集校正模型的射线能量相近,PaxScan2520 面阵探测器增益校正图像的亮场模型灰度一般是在其手册规定线性范围之内,这样,使得校正后空屏图像的输出也在此线性范围之内,因此,输出图像的亮度均匀.但在实际射线检测中,随着工件厚度的改变,为了照透工件,使用的输入能量加大,工件越厚,使输出图像中工件的灰度值与背景的灰度值相差越大.当检测图像背景灰度超过系统的线性范围时,就会出现非线性即不一致性.换句

话说,即是当建立灵敏度校正模型与实际检测工件所需的射线能量相差较大,使得在实际输出的工件图像中,为了保证被检工件被照透,背景灰度值超出系统线性范围,甚至接近饱和,成像背景出现亮度不均匀现象.因此,需要进行二次校正建模,并对检测图像做二次校正.二次校正实质是对检测工件成像在一次增益校正的基础上进行的.校正后的图像可由下式得到(结果见图 4).

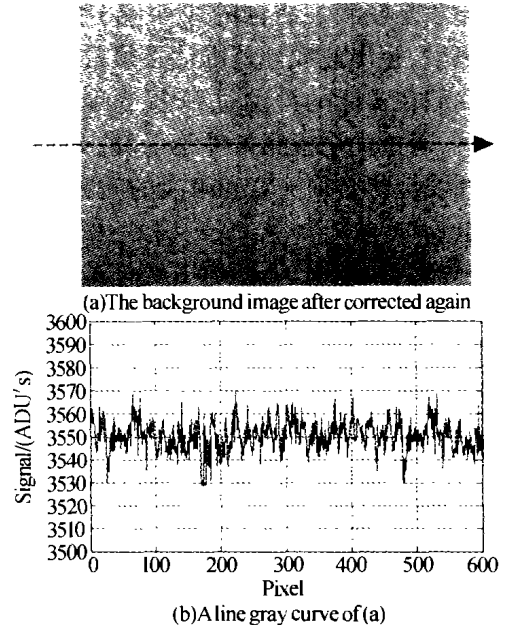


图 4 二次校正后的背景图像及灰度曲线图
Fig. 4 The background image and its curve after corrected again

$$I_{gr}(x_i, y_i) = K_r(x_i, y_i) \times I_g(x_i, y_i) \quad (9)$$

式中, $I_{gr}(x_i, y_i)$ 为二次校正后的图像; $G_r(x_i, y_i)$ 为二次校正的基准图像;

$$K_r(x_i, y_i) = \frac{G_r(x_i, y_i) - B(x_i, y_i)}{G(x_i, y_i) - B(x_i, y_i)}$$

4 校正注意的问题

上述理论分析是在假设条件成立的情况下进行的,在进行校正之前应注意以下几点:

1) 首先要对坏像素进行校正.坏像素是指像素在偏置、灵敏度和稳定性方面与周围像素相比较出现的异常,即在图像中像素晶格点阵的缺陷会产生不能吸收光电子的死像素,或单个探测器像元对射线响应不敏感(甚至没有响应)或过于敏感,从而在图像中出现的比相邻像素灰度值高或低的白点或黑点.常用的坏像素校正方法是:利用其周围 8 个像素点的均值来代替.

2) 基准图像的采集.比例成像系统校正的前提是保证每个像元的成像都是在系统的动态范围之内,即输入和输出呈线性,灵敏度基准图像应接近系统动态范围的中间点.同时要进行多幅叠加,消除随机噪声.

3)二次校正基准图像的获得,是在与采集工件相同的条件下,采集经多幅叠加的空屏图像.

5 结论

通过对比例成像系统的成立条件分析,得到系统成像的校正方法,经实际图像的处理验证显然是可行的.它有效地消除了通道间的不一致性,降低了图像的标准差,使成像信噪比得到明显的提高.但校正方法是在满足成像的线性范围内有效的,当实际检测时,超出此线性范围就必须重新进行校正.这将是我们在实际的检测过程中,如何针对不同的检测工件,通过优化检测条件等手段,实现探测器灵敏度特性线性化必须注意和解决的问题.

参考文献

- 1 Hoheisel M, Arques M, Chaussat J, et al. Amorphous silicon X-ray detectors. *Journal of Non-crystalline Solids*, 1998, **230** (Part B): 1300 ~ 1305
- 2 VARIAN Company. PaxScan 2520 SysSvc2. book American: 2000. 10
- 3 Moy J P, Bosset B. How does real offset and gain correction affect the DQE in images from X-ray Flat detectors. *Part of the SPIE Conference on Physics of Medical Imaging*, San Diego. California. February 1999, **3659**: 90 ~ 97
- 4 王义,王经瑾,王奎禄,等.一种应用于X射线成像系统的多CCD图像传感器. *光子学报*, 1999, **28**(1): 51 ~ 56
Wang Y, Wang J J, Wang K L, et al. *Acta Photonica Sinica*, 1999, **28**(1): 51 ~ 56
- 5 Kenneth R, Cast leman. *Digital Image Processing*. Beijing: Tsinghua University Press, 1998
- 6 路宏年,郑兆瑞编著. *信号与测试系统*.北京:国防工业出版社出版,1988
Lu H N, Zhen Z R. *Signal and Test System*. Beijing: National Defence Industry Press, 1988
- 7 赵瑾,朱煜,梁诚,等.数字X射线图像的面不同一性校正研究. *光子学报*, 2002, **31**(10): 1244 ~ 1247
Zhao J, Zhu Y, Liang C, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(10): 1244 ~ 1247

The Corrected Research of Flat-panel Detector Imaging System

Liang Lihong, Lu Hongnian

Mechanical Engineering & Automation School of Beihang University, Beijing 100083

Received date: 2003-09-16

Abstract Based on the linearity shift-invariant theory, the imaging feature of flat-panel detector and the reason of uneven image are analyzed. By analyzing the assumed condition of linearity system tenable, the correct formula is obtained to correct the offset and sensitivity of each pixel. In the laboratory, the satisfying effect is gained on PaxScan2520 flat-panel detector. The noise is effectively restrained and the nonuniformity is improved. The method of corrected again is presented when the workpieces imaging beyond the linearity range. The correction result is also proved effectively.

Keywords Radiography; Flat-panel detector; Non-uniformity; Correction; Offset; Sensitivity



Liang Lihong A senior-engineer, was born in 1966. She received her B. S. and H. S. degrees from North China University of Science and Technology in 1989 and 1992 respectively. She is now a Ph. D. candidate in Mechanical Engineering & Automation School of Beihang University. Her research direction is signal/image processing and NDT.