

基于递变能量线性约束的 X射线图像质量评价方法

李毅红, 韩 焱, 潘晋孝, 陈 平

(中北大学信息探测与处理山西省重点实验室, 山西太原 030051)

摘 要: X射线图像质量评价是射线检测正确与否的关键问题,传统的人工主观评价方法效率低,实时性差,常用的对比度、清晰度等考核指标,受成像过程的散射及噪声影响,存在一定的局限性.为此论文提出基于递变能量线性约束的X射线图像质量评价方法.文章首先通过分析递变能量成像过程中图像序列的灰度变化规律,提出序列间灰度增益分布图,并依据成像器件的线性最优成像,从分布图中提取线性散布度评价图像质量;进一步针对过曝光影响散布度评价失败问题,综合线性散布度和平均对比度,构建了新的图像质量综合评价标准,实现射线图像质量评价.最后通过实验验证了论文方法的可行性,能够有效避免传统单一评价指标的局限性.

关键词: X射线成像; 图像质量评价; 递变能量成像; 线性散布度; 平均对比度

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2017)03-0669-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2017.03.025

X-Ray Image Quality Evaluation Based on Linear Constraint with Variable Energy

LI Yi-hong, HAN Yan, PAN Jin-xiao, CHEN Ping

(Shanxi Key Lab of Signal Capturing & Processing, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China)

Abstract: X-ray image quality evaluation is the key problem of ray detection accuracy. The efficiency and real-time of the traditional subjective assessment method is poor. Also for some objective assessment indexes, such as contrast, definition, and so on, they have a certain limitation because of scatter and noise in the X-ray imaging. So this paper provides the method of X-ray image quality evaluation based on linear constraint with variable energy. First, based on the gray trend between the ray image sequences with variable energy imaging, the concept of the gray gain histogram between sequences is provided. Then based on the linear optimal imaging about imaging detector, evaluate image quality by the linear dispersion. Further, for the failure of dispersion evaluation because of over-exposure, synthesizing the linear dispersion and average contrast, the paper builds a standard of ray image quality evaluation. At last, the experiment proves the feasibility about this new standard. And it can avoid the limitation of the traditional single evaluation index.

Key words: X-ray imaging; image quality evaluation; varying energy imaging; linear dispersion; average contrast

1 引言

X射线成像主要是利用检测对象密度、厚度对射线能量衰减的差异性,表征检测对象的内部结构信息.在实际过程中如何获取一幅图像质量较高的射线图像,对于后续的缺陷检测、结构分析等具有重要意义.但是现有的检测过程中主要是通过操作人员对图像的主观评价来对射线源的管电压和管电流进行反复调节,最

后依据经验获取最佳成像参数.这种方法效率低下,实时性差,而且易受人的主观影响,究其原因主要是现有的图像质量客观评价方法可靠性不高^[1-3].

现有的图像质量客观评价算法主要以图像灰度和纹理结构计算图像的亮度、清晰度、对比度等参数,通过参数分析选择最优质图像.但是对于X射线成像而言,成像器件所接受的射线光子除了衰减光子,还存在散射光子,从而降低图像对比度.而且散射光子是随机的,

随着检测对象的结构不同,散射分布也不同,单纯的对比分析无法界定最优成像质量.同时对于所获得射线图像是厚度累加的物体影像,图像的边缘结构模糊,从清晰度角度考虑图像质量也存在一定的局限性^[4,5].因此,针对射线图像质量评价,现有的单一指标无法满足需求.

一般在 X 射线系统部件及成像方式一定的情况下,对于某一检测对象射线图像质量主要受射线能量(管电压和管电流)影响.在能量变化的过程中,图像质量逐渐在变化.理论上,在低能量下由于射线穿透力不足,图像对比度较低;随着射线能量增加,对比度逐渐提高;但是高到一定程度,将会由于过曝光降低图像质量;最优成像质量肯定在这个能量增加的过程中间出现^[6].因此如何确定这个最优成像点成为正确评价图像质量的核心,即本文研究重点.

2 递变能量序列间的图像质量评价分析

在射线能量递变的过程中,受射线多谱特性、指数衰减、衰减系数与能量的非线性相关、散射等影响,与射线能量相关的非线性成像模型难以刻画,但是所表征的图像质量是逐渐提高的^[7,8].然而,射线能量递增不能无限制地改善射线图像质量,当射线能量过高,透射的光子数超出成像系统的物理动态范围,将出现过曝光现象,降低图像质量.目前,受非线性成像模型的影响,无法获悉能量递增过程中的最优成像条件.在数值分析中,非线性模型可用分段线性模型近似分析,分段区间越短,近似程度越高.因此可分析递变能量图像序列之间的灰度及图像质量线性变化关系,表征整个能量递增过程中的非线性成像特性.

2.1 序列间灰度增益分布图

在射线能量的递增过程中,相邻能量序列的图像存在灰度增益,而且通过分析灰度的增益情况可实现序列间线性程度的表征,对此论文提出序列间灰度增益分布图.该图主要表征物体同一区域在相邻能量下的灰度统计分布.图中任一点的坐标为图像中某一固定区域处(检测物体中的同一区域)的点在相邻能量下的图像灰度值.当考虑射线图像中所有点时便形成了增益分布图.

图1为U盘在50keV和50.5keV能量下的图像,图2为图1的灰度增益分布图.图2中横轴为50keV的灰度,纵轴为50.5keV灰度.图2中每个点代表U盘的某个位置在不同能量下的灰度.

2.2 线性散布

对于图2灰度增益分布图,如果能量一样,图中的点集为过原点,斜率为1的直线;当能量存在差异时,灰度呈非线性提升.因此,可通过拟合直线,并求图中各点

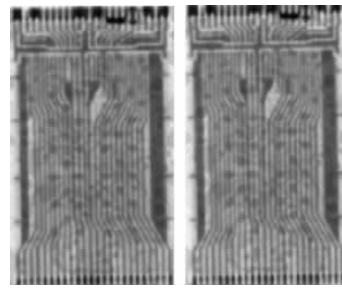


图1 U盘在50keV(左)和50.5keV(右)透照图

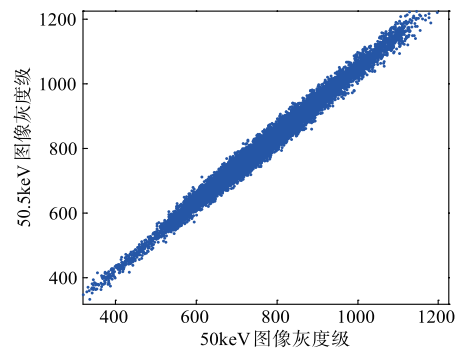


图2 图1序列间的灰度增益分布图

相对于直线的距离,即可刻画非线性差异,在这定义为线性散布.对图2的中点 $(x(i), y(i))$ 进行式(1)的线性拟合:

$$y(i) = p_1 * x(i) + p_2 \quad (1)$$

式(1)中 $x(i)$ 表示较低能量的图像灰度, $y(i)$ 表示较高能量的图像灰度.按照点到直线的距离计算方法,定义线性散布 $V_i(2)$:

$$V_i = \frac{|p_1 * x(i) - y(i) + p_2|}{x(i) * \sqrt{1 + p_1^2}} \quad (2)$$

式(2)中,为了避免灰度基值对点到直线距离的影响,采用相对距离,除以能量较低的图像灰度 $x(i)$.根据式(2),可得线性散布如图3所示:

按照上述方法可得到52keV与52.5keV、55keV与55.5keV、60keV与60.5keV、63keV与63.5keV下的散布度图.

从图4可以看出,随着能量的增高,线性散布越来越集中,表明图像序列间的线性相关性较高.按照

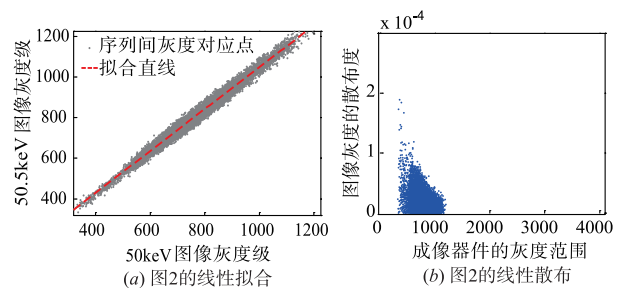


图3 图2的线性拟合及线性散布

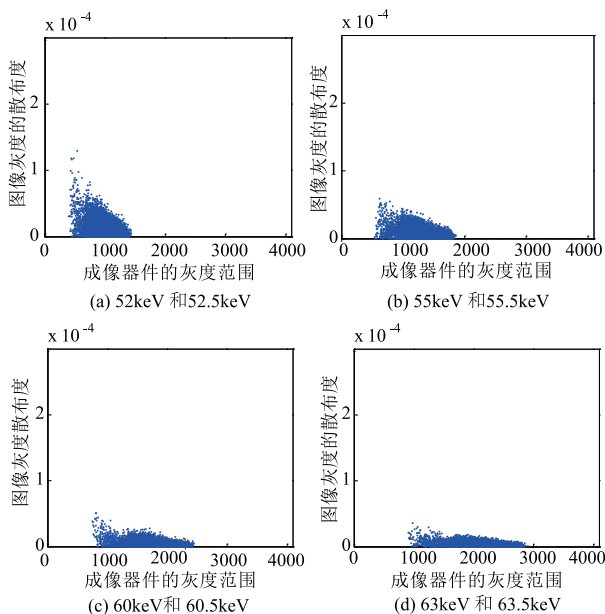


图4 不同能量下的灰度散布图

数字成像器件特点,当线性度较高时一般成像质量较好.因此可采用上述线性散布来评价射线图像质量.

2.3 基于线性散布度的图像质量评价方法

式(2)是针对每个点而言,为了表征线性散布的总体测度,采用点到直线相对距离的平均值,刻画性散布度 V_d .

$$V_d = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|p_1 * x(i) - y(i) + p_2|}{x(i) * \sqrt{1 + p_1^2}} \quad (3)$$

现对 U 盘进行递变能量成像,能量递变范围为:50keV ~ 90keV,递变间隔 0.5keV,共计 63 幅图像序列.按照式(3),获取序列间的线性散布如图 5 所示.

按照图 5,在第 38 (68.5keV) 个点处曲线开始无规则变化,现将第 37 (68.0keV)、38 (68.5keV) 点对应的图像取出,如图 6 所示.很容易看出,从第 38 (68.5keV) 点开始,曲线变得毫无规律,主要是因为图像中出现过曝光区域,这些区域对图像整体的质量影响较大,从而出现波动.

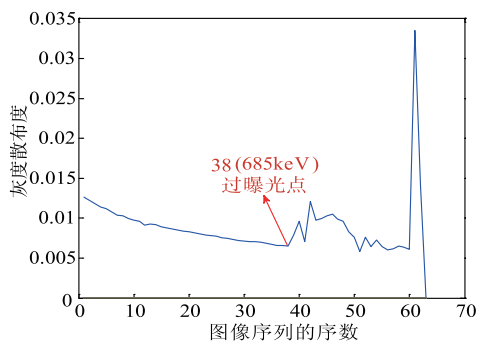


图5 各能量下的线性散布度

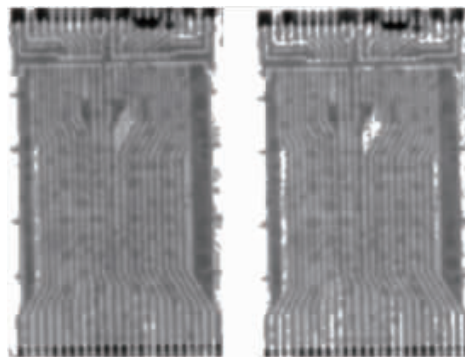


图6 第37(68keV)(左)、38(68.5keV)(右)幅射线图像

但是按照这个点取最优参数,其图像质量并不高,主要是由于射线能量过高,图像灰度接近系统动态范围的高值,灰度变化范围小,其线性程度较高,但对比度较低.因此,对于图像质量来说,线性散布度的取值不能无限大或无限小,可考虑引入平均对比作为约束,抑制过曝光现象.

3 基于平均对比度和线性散布度的图像质量评价方法

3.1 平均对比度

一般情况下,如果被测物体内部结构主要是通过不同区域不同灰度表征,相邻区域的灰度差定义为图像的对比度^[9,10].定义图像中的最大灰度值 G_{\max} 和最小灰度值 G_{\min} ,同时求出整幅图像的平均灰度值 G_a ,得到式(4):

$$AC = \frac{G_{\max} - G_{\min}}{G_a} \quad (4)$$

按照式(4)得到 U 盘图像序列的平均对比 AC 的曲线图,如图 7 所示:

从图像上可以看出,随着能量的上升,平均对比度是逐渐下降的,中间的突起处是由于图像中的部分区域已经过曝光,因此影响了计算出的 AC 值,故突起之后的图像就不予考虑了.但是初始能量下,由于射线剂量水平较低,图像噪声高,对比度也较高,因此单独采用对比度无法衡量图像质量.

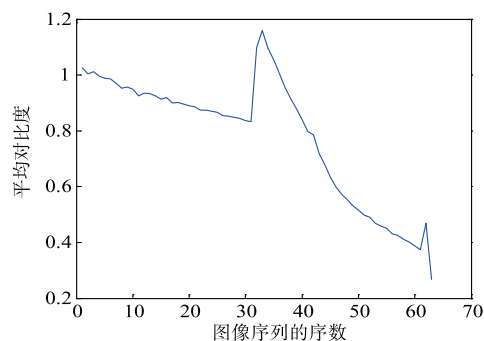


图7 不同能量下的AC值

3.2 评价标准

通过上述分析,对于线性散布度来说,其值在一定范围内越小,所得图像越符合标准;而从平均对比度的物理意义来看,其值越大图像就越清晰.于是,可将这两个量联立得到式(5)所示的图像最终评价标准.

$$SOA = \frac{1}{AC} + \beta * V_d \quad (5)$$

由于线性散布度与平均对比度的取值范围不同,所以若要将这两个量联系起来,确保存在极值,需要将统一取值范围,使比较基数一致,具体通过参数 β 体现.从图5中,在图像序列未出现过曝光之前,散布度取值范围为 $[0.005, 0.015]$ 之间;图7中,未过曝光之前,AC倒数取值基本都大于1,由此以1为基数,将0.005扩大200倍,即 $\beta = 200$.如此可得到不同能量下的SOA曲线,如图8所示.图8表现出良好的凸函数特性,可取出第26幅图(62.5keV)为当前区域的最佳图像.

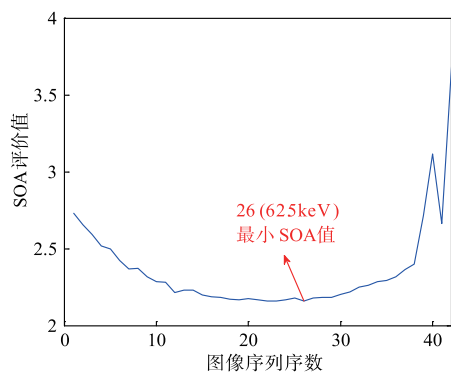


图8 不同能量下的SOA曲线图

同时,为了验证SOA曲线所评价优质图像的有效性,邀请测试者进行主观质量感知评价.图像数据为采集的递变能量图像序列中第15(57.0keV)、20(59.5keV)、26(62.5keV)、28(63.5keV)、35(67.0keV)、40(69.5keV)幅图像(图9).

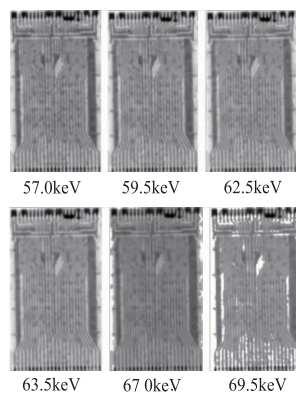


图9 不同能量下的射线图像序列

依据ITU-R_BT.500-11协议,依托山西省现代无损检测工程技术研究中心,邀请20名从事X射线数字

成像研究的专业人员进行主观图像质量评价,按照视觉感受级进行评分.评分标准采用国际上规定的5级妨碍尺度(非常好-5分,好-4分,一般-3分,差-2分,非常差-1分),评价结果按照均分列于表1中.

表1 观察人员的评判结果

能量	57.0	59.5	62.5	63.5	67.0	69.5
人数	2.8	2.3	4	3.5	1.5	1

从图9及表1中可以看出,本文所研究的图像质量评价方法与实际中的观测结果基本吻合.

4 实验结果

3.2节中得到了图像质量评价标准,现使用另一组数据进行验证.验证数据采用鼠标图像,能量参数和U盘实验一致.透射图像如图10所示,质量评价区域为图中标注区域.

根据前面研究的图像质量评价方法,求出鼠标图像的SOA值,并将不同能量下的SOA值示于图11中.通过图11可以看出,对于所选图像区域,在60keV电压下图像质量达到理想水平.

进一步,列取58.0keV、60.0keV及62.0keV下的鼠标图像(图12),从图中矩形标记区域来看,60keV图像细节信息优于58keV;在椭圆标记区域,62keV图像出现过曝光,影响图像质量.由此,60keV下的图像质量相对于另外两个电压来说是最佳的,从而验证了论文提出的图像质量评价方法的合理及实用性.

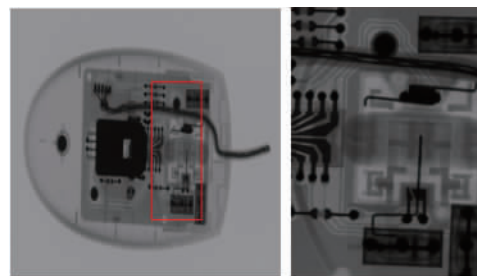


图10 鼠标透照图及所选区域

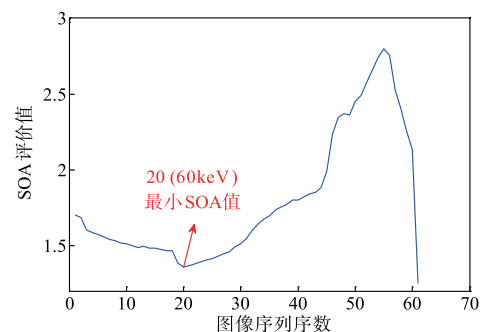


图11 不同能量下鼠标的SOA值

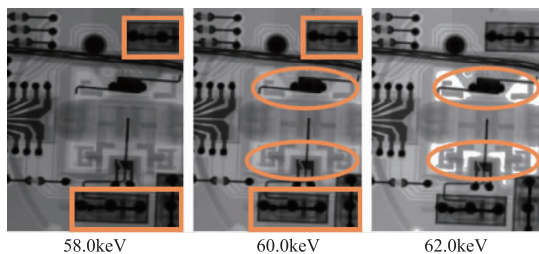


图12 不同能量下的鼠标图

5 结论

本文针对 X 射线图像质量评价问题,在分析递变图像序列灰度变化特性,提出了序列间灰度增益分布图的概念,并对分布图中的线性特性采用线性散布表征;同时结合平均对比度,提出了基于线性散布度和平均对比度的图像质量评价方法.以 U 盘和鼠标在不同能量下的图像序列为对象,进行实验验证,结果表明,论文提出的方法能够有效避免传统单一评价指标的局限性,可以实现射线图像质量的评价.

参考文献

- [1] 韩焱. 射线数字成像检测技术[J]. 无损检测, 2003, 25(9): 468 - 471.
Han Yan. Digital radiographic technology [J]. Nondestructive Testing, 2003, 25(9): 468 - 471. (in Chinese)
- [2] Moorthy A K, Bovik A C. Blind image quality assessment: From natural scene statistics to perceptual quality [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2011, 20(12): 3350 - 3364
- [3] Floyd C E, Warp R j, Dobbins J T, Chotas H G, Baydush A H, Vargas-Voracek R, Ravin C E. Imaging characteristics of an amorphous silicon flat-panel detector for digital chest radiography[J]. Radiology, 2001, 218(3): 683 - 688.
- [4] 杨春玲, 高文瑞. 基于结构相似的小波域图像质量评价方法的研究[J]. 电子学报, 2009, 37(4): 845 - 849.
Yang C L, Gao W R. Research on image quality assessment in wavelet domain based on structural similarity [J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(4): 845 - 849. (in Chinese)
- [5] 贾旭, 曹玉东, 孙福明, 等. 基于无参考质量评价模型的静脉图像采集方法[J]. 电子学报, 2015, 43(2): 236 - 241.
Jia X, Cao Y D, Sun F M, et al. Vein image acquisition method based on quality assessment model without reference [J]. Acta Electronica Sinica, 2015, 43(2): 236 - 241. (in Chinese)
- [6] 陈平, 韩焱, 潘晋孝. 变能量 X 射线多谱成像方法研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(5): 1383 - 1387.
Chen P, Han Y, Pan J X. Research on X-ray multi-spectrum imaging based on variable energy [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(5): 1383 - 1387. (in Chinese)
- [7] Mittal A, Moorthy A K, Bovik A C. No-reference image quality assessment in the spatial domain [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2012, 21(2): 4695 - 4708.
- [8] Akhter R, Sazzad Z M P, Horita Y, Baltes J. No-reference stereoscopic image quality assessment [A]. Stereoscopic Displays and Applications XXI [C]. San Jose, California: SPIE, 2010, 75240T-1 - 75240T-12
- [9] Imamura Y, Kobayashi R, Nakai H. Linearity condition for orbital energies in density functional theory (II): Application to global hybrid functionals [J]. Chemical Physics Letters, 2011, 513(1 - 3): 130 - 135.
- [10] Luo Changwei, Li Rui, Yu Lingyun, et al. Automatic tongue tracking in X-ray imaging [J]. Chinese Journal of Electronics, 2015, 24(4): 767 - 771.

作者简介



李毅红 女, 1983 年 2 月, 山西临汾人, 博士, 中北大学理学院讲师, 主要从事信号与信息处理、应用数学方面的研究工作。
E-mail: liyihong0227@163.com

韩焱 男, 1957 年 6 月, 山西文水人, 博士, 中北大学教授, 博士生导师, 主要从事信号与信息处理方面的研究。

E-mail: hanyan@nuc.edu.cn

潘晋孝 男, 1967 年 1 月, 山西万荣人, 博士, 中北大学教授, 博士生导师, 主要从事 CT 重建方面的研究。

E-mail: panjx@nuc.edu.cn

陈平 (通信作者) 男, 1983 年 9 月, 安徽池州人, 博士, 中北大学信息与通信工程学院副教授, 主要从事信号与信息处理, CT 重建方面的研究工作。

E-mail: pc0912@163.com