

DOI: 10.7652/xjtub201307017

考虑人眼视觉特性的射线检测数字图像质量评价方法

穆为磊, 高建民, 王昭, 姜洪权, 陈富民, 党长营
(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对增强处理后图像的客观评价值和主观评价值不一致的问题,提出了一种基于人眼视觉特性的图像质量评价方法。通过分析人眼视觉系统的感应特性,给出了位置影响因子、细节影响因子和灰度影响因子的定义,综合这些影响因子后得到了基于人眼视觉的质量影响权值。采用该权值对图像失真敏感度、失真度、信息熵增量和结构相似度等客观评价指标进行重构,并对各重构后的客观评价指标进行综合,得到了图像评价的综合指标。实验结果表明,该方法的线性相关系数比峰值信噪比和结构相似度分别提升了 80.02%和 78.85%,绝对误差均值比峰值信噪比和结构相似度分别提升了 3.96%和 7.96 倍,均方根比峰值信噪比和结构相似度提升了 6.45%和 8.37 倍, Spearman 等级相关系数比峰值信噪比和结构相似度分别提高了 1.01 倍和 1.69 倍,表明该方法的评价正确性高、单调性最优,因此更适合于对射线检测数字图像的质量评价。

关键词: 人眼视觉特性;射线图像;图像评价

中图分类号: TN911.73 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)07-0091-05

Radiographic Image Assessment Approach Based on Human Visual System

MU Weilei, GAO Jianmin, WANG Zhao, JIANG Hongquan, CHEN Fumin, DANG Changying
(State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Focusing measurement for subjective assessment of enhanced radiographic image, an image assessment method based on human visual system is proposed. The response characteristic of human visual system is analysed, and the weight coefficient based on human visual system is suggested. The appropriate objective indexes are then chosen to construct the weighted objective indexes, which are synthesized as image assessment index. The proposed strategy promotes the linear correlation coefficient 80.02% and 78.85% compared with peak signal noise ratio (PSNR) and structural similarity index measurement (SSIM) to indicate higher correctness. The mean absolute error in this strategy is 3.96% higher and 7.96 times, and the root mean square is 6.45% higher and 8.37 times than PSNR and SSIM, showing a better consistency. And the approach improves by 1.01 and 1.69 times in Spearman rank of correlation coefficients, showing its fine monotonicity.

Keywords: human visual system; radiography image; image assessment

为了提高射线检测数字图像的视觉质量,很多学者进行了图像增强处理的研究工作^[1],但如何衡量增强处理后的图像质量、评价图像信息的保真度和可视性是一个需要解决的关键问题^[2]。图像质量评价分为主观评价和客观评价 2 种方法^[3],主观评价方法(MOS)是测试者直接观察图像

并根据标准的评价尺度对图像进行打分。主观评价方法虽然能较好地反映图像的直观视觉质量,但是主观评价方法过程复杂,耗时长,缺乏稳定性,易受观察者、图像类型和观测环境等因素的影响。客观评价方法主要是通过提取质量评估参数,并建立质量评估的数学模型对图像质量进行定量评估。常用的客观评价方法分为:全参考方法和半参考方法。全参考方法是对整幅图像的变化量进行统计分析,如均方误差(MSE)和峰值信噪比(PSNR);半参考方法是对整幅图像统计特征的变化进行处理分析,如结构相似度(SSIM)。这些方法表达简单、计算方便,但都没有考虑到人眼的视觉特性,评价结果往往与主观评价结果不同^[4]。在对射线检测时,检验人员主要通过观察射线检测数字图像来判断有无缺陷。图像主观质量不仅与图像信息的保真度有关,而且与人眼视觉的响应有直接的关系,因此对于射线检测数字图像,其图像质量的核心指标需要充分考虑人眼的视觉特性和图像的客观保真度。

本文通过对影响人眼视觉因素的分析,给出了位置影响因子、细节影响因子和灰度影响因子(简称 3 种影响因子)的定义,将这些影响因子作为人眼视觉特性的权重因子,分别对图像失真敏感度、失真度、信息熵增量和结构相似度等 4 种图像质量的评价指标进行重构,得到了 4 种基于人眼视觉特性的图像质量客观评价指标。采用加权综合后的 4 种综合评价指标对射线检测数字图像的质量进行评价,得到了与主观评价较一致的结果。

1 基于人眼视觉的权值分配方法

1.1 影响人眼视觉的因素

人眼视觉系统是一个复杂的具有自适应调节能力的光学神经系统,影响图像中缺陷细节分辨力的是缺陷周围的细节信息和背景信息,而不是整个图像的结构信息和背景环境^[5]。由于存在缺陷的焊缝区是射线检测人员感兴趣的区域,该区域的质量对整幅射线图像的视觉质量起决定性作用,而没有缺陷的母材区域对视觉质量的影响很小,因此图像质量评价过程中需要将图像划分为子块,将感兴趣区域的评价参数赋予较大的权重。

假设图像 I 分辨率为 $M \times N$,并划分为 $m \times n$ 个大小为 $k \times l$ 的子图像,满足 $M=k \times m, N=l \times n$, m, n 为正整数,各子图像记为 $I_{i,j}$,其中 i, j 为子图像的编号, $1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n$ 。

1.1.1 位置影响因子 通常情况下,人眼先观察图

像的中央部分,然后依次向周围扩展。由于射线数字图像中焊缝区域位于图像中部,母材区域位于图像的上部和下部,因此位置影响因子只考虑垂直方向的影响。子图像的位置影响因子为

$$\alpha_{i,j} = 1 - |(2i - m - 1)| (1 - B/m + 1) \quad (1)$$

式中: B 为基础系数,与人眼距图像的距离及人眼视野相关,一般取 0.5。

1.1.2 细节影响因子 对于人眼视觉系统的研究表明,人眼对形状的感知是由边界灰度的突变引起的,通过追踪相连接的灰度突变的像素来获得一个物体的边界。选择灰度标准方差来描述区域灰度的突变程度,方差越大表明该区域细节越多,能引起人眼视觉的响应越大。反之,方差越小表明该区域越平滑,细节越少。子图像的细节影响因子为

$$\beta_{i,j} = \sigma_{i,j} = \left(\sum_{x=(i-1)k}^{ik-1} \sum_{y=(j-1)l}^{jl-1} (G_{x,y} - \hat{G}_{x,y})^2 / kl \right)^{1/2} \quad (2)$$

式中: $\sigma_{i,j}$ 为子图像的灰度方差; $G_{x,y}, \hat{G}_{x,y}$ 分别为原图像和处理后图像在 x, y 像素处的灰度值。

1.1.3 灰度影响因子 人眼对图像灰度的响应不仅取决于灰度的绝对值,而且取决于图像相对于背景灰度的突变程度。由 Weber-Fechner 法可知,视觉上主观亮度与光刺激强度的对数成正比,即

$$s = \kappa \lg(G/G_0) \quad (3)$$

式中: κ 为常数; G_0 为背景区域的平均灰度值; G 为缺陷区域的平均灰度值。子图像中灰度变化产生的影响因子为

$$\gamma_{i,j} = \lg(\max(G_{x,y}) / \left(\sum_{x=(i-1)k}^{ik-1} \sum_{y=(j-1)l}^{jl-1} G_{x,y} / kl \right)) \quad (4)$$

1.2 权重因子的确定

为了降低方法的复杂度,假设人眼视觉受到 3 种影响因子的综合影响,并且影响因子对人眼的视觉影响是等权重的^[6],因此子图像的综合权重为

$$\omega'_{i,j} = (\alpha_{i,j}^2 \beta_{i,j}^2 \gamma_{i,j}^2)^{1/2} \quad (5)$$

对子块综合权重进行归一化处理,得到的权重因子为

$$\omega_{i,j} = \omega'_{i,j} / \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n \omega'_{i,j} \quad (6)$$

2 图像客观评价指标

图像客观评价指标中的失真敏感度、失真度、信息熵增量和结构相似度为 4 种常用的客观评价指标。将人眼视觉特性的权重分配方法引入到图像客

观评价指标中,构建了人眼视觉相关的客观评价模型。

2.1 图像的失真敏感度

失真敏感度是分析噪声对图像质量影响的一个因素。子图像的失真敏感度为

$$E_{i,j} = \sigma_{i,j} / \mu_{i,j} \quad (7)$$

$$\mu_{i,j} = \sum_{x=(i-1)k}^{ik-1} \sum_{y=(j-1)l}^{jl-1} (G_{x,y} - \hat{G}_{x,y}) / kl \quad (8)$$

式中: $\mu_{i,j}$ 为子图像的灰度平均值。为了避免评价指标数量级不一致对评价结果产生的影响,将各子块的评价指标进行数据归一化处理,然后进行加权叠加。图像的失真敏感度为

$$E = \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} \omega_{i,j} \bar{E}_{i,j} \quad (9)$$

式中: $\bar{E}_{i,j}$ 为经过归一化处理后的子图像失真敏感度。

2.2 图像的失真度

在通信理论中,信号失真度是用来衡量信号传输中接收信号与原信号信息差异的程度。图像的失真度及子图像的失真度分别为

$$L = \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} \omega_{i,j} \bar{L}_{i,j} \quad (10)$$

$$L_{i,j} = kl \sigma_{i,j}^2 / \sum_{x=(i-1)k}^{ik-1} \sum_{y=(j-1)l}^{jl-1} G_{x,y}^2 \quad (11)$$

式中: $\bar{L}_{i,j}$ 为经过归一化处理后的子图像失真度。

2.3 图像的信息熵增量

在图像处理中,信息熵是用来衡量图像灰度期望值的。处理后的图像信息熵增量及子图像信息熵增量分别为

$$\Delta H = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n \omega_{i,j} \Delta \bar{H}_{i,j} \quad (12)$$

$$\Delta H_{i,j} = \sum_{g=0}^{255} P_{i,j}(g) \ln(P_{i,j}(g)) - \sum_{g=0}^{255} \hat{P}_{i,j}(g) \ln(\hat{P}_{i,j}(g)) \quad (13)$$

式中: $\Delta \bar{H}_{i,j}$ 为归一化处理后的子图像信息熵增量; g 为图像中像素的灰度值; $P_{i,j}(g)$ 、 $\hat{P}_{i,j}(g)$ 分别为原图像和处理后图像在第*i,j*个子块中的发生概率。

2.4 图像的结构相似度

图像的结构是图像的总体特征,人眼视觉系统通过对图像结构性特征的提取,得到了对图像的总印象。如果处理图像与原始图像之间的结构相似度越高,说明处理过程中图像总体信息的损失越少。因此,该评价指标是图像灰度、对比度和结构相似性的综合。子图像的结构相似度为^[7]

$$S_{i,j} = G(G_{i,j}, \hat{G}_{i,j}) C(G_{i,j}, \hat{G}_{i,j}) S(G_{i,j}, \hat{G}_{i,j}) = (2u_{i,j}\hat{u}_{i,j}/u_{i,j}^2 + \hat{u}_{i,j}^2)(2\sigma_{i,j}\hat{\sigma}_{i,j}/\sigma_{i,j}^2 + \hat{\sigma}_{i,j}^2) \cdot (2C_{i,j}/\sigma_{i,j}^2 + \hat{\sigma}_{i,j}^2) \quad (14)$$

$$u_{i,j} = \sum_{x=(i-1)k}^{ik-1} \sum_{y=(j-1)l}^{jl-1} G_{x,y} / kl \quad (15)$$

$$\hat{u}_{i,j} = \sum_{x=(i-1)k}^{ik-1} \sum_{y=(j-1)l}^{jl-1} \hat{G}_{x,y} / kl \quad (16)$$

$$\sigma_{i,j} = \left(\sum_{x=(i-1)k}^{ik-1} \sum_{y=(j-1)l}^{jl-1} (G_{x,y} - u_{i,j})^2 / kl \right)^{1/2} \quad (17)$$

$$\hat{\sigma}_{i,j} = \left(\sum_{x=(i-1)k}^{ik-1} \sum_{y=(j-1)l}^{jl-1} (\hat{G}_{x,y} - \hat{u}_{i,j})^2 / kl \right)^{1/2} \quad (18)$$

$$C_{i,j} = \sum_{x=(i-1)k}^{ik-1} \sum_{y=(j-1)l}^{jl-1} (G_{x,y} - u_{i,j})(\hat{G}_{x,y} - \hat{u}_{i,j}) / kl \quad (19)$$

式中: $G(G_{i,j}, \hat{G}_{i,j})$ 为灰度比较部分; $C(G_{i,j}, \hat{G}_{i,j})$ 为对比度比较部分; $S(G_{i,j}, \hat{G}_{i,j})$ 为结构相似性比较部分; $u_{i,j}$ 、 $\hat{u}_{i,j}$ 分别为原图像和评价图像中子图像的灰度均值; $\sigma_{i,j}$ 为处理后图像的灰度均方差; $C_{i,j}$ 为原图像和评价图像的灰度协方差。图像的结构相似度为

$$S = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n \omega_{i,j} S_{i,j} \quad (20)$$

3 图像综合评价指标

基于人眼视觉特性的客观评价指标模型可以作为单独的图像质量评价指标,也可以进行赋权综合后作为综合的图像评价指标。为了能够更方便地分析图像视觉质量,将基于人眼视觉的客观评价模型进行综合处理,并将累加的结果作为最终的综合评价。基于人眼视觉特性的图像质量综合评价指标(简称综合评价)为

$$Q = \epsilon_1 E + \epsilon_2 L + \epsilon_3 \Delta H + \epsilon_4 S \quad (21)$$

式中: ϵ_1 、 ϵ_2 、 ϵ_3 、 ϵ_4 分别为评价指标中失真敏感度、失真度、信息熵增量和结构相似度的权重值,并满足 $\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 + \epsilon_4 = 0$ 。

失真敏感度是对图像质量中噪声影响的描述,其值越大表示噪声越大,即表示图像质量越差。通常,图像质量评价指标的取值越大表示图像质量越好,因此失真敏感度的权重值取为负值^[6]。在射线检测图像中,噪声对图像质量的影响仅次于图像的模糊失真,因此权重值取 $\epsilon_1 = -0.5 \sim -0.3$ 。失真度是对影响图像质量因素中的信息保真的整体描述,失真度越大表示图像失真越大,即表示图像质量越差。由于射线检测图像的分辨力较低,影像模糊,

因此对失真度取较大的权重值,即 $\epsilon_2 = -0.7 \sim -0.5$ 。信息熵是对图像整体信息密度的描述,射线检测图像总体基本相似,所以信息熵对图像质量的影响相对较小,对其取较小的权重值,即 $\epsilon_3 = 0.1 \sim 0.2$ 。结构相似度是测量处理后图像与原始图像的相似度,结构相似度越大,表明处理后图像与原始图像相符合的程度越高,因此取较大的权重值,即 $\epsilon_4 = 0.8 \sim 0.9$ 。经大量实验验证,本文取 $\epsilon_1 = -0.4$, $\epsilon_2 = -0.6$, $\epsilon_3 = 0.2$, $\epsilon_4 = 0.8$ 。

4 实验及分析

为了评估本文方法提出的质量评价指标,根据视频质量专家组(VQEG)推荐的标准^[8],对本文方法的质量评价指标进行了量化分析。实验步骤如下。

步骤 1 建立图像库并给出每幅图像的主观评价价值。本文的图像库包括 30 幅原始射线数字图像和 120 幅处理后的图像,并采用直方图均衡、线性变换、对数变换、自定义对数变换^[9]算法对图像进行了处理。图 1 展示了原图及处理后的图像,并按照表 1 所示的评价标准对 120 幅处理后的图像进行了主观评价,评价分值越大表示图像质量越好。

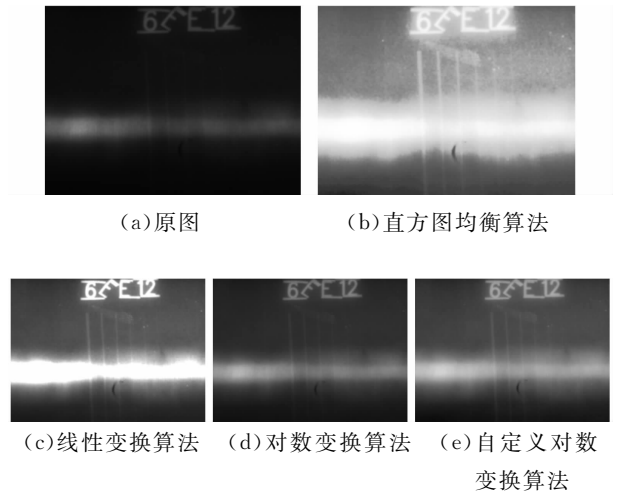
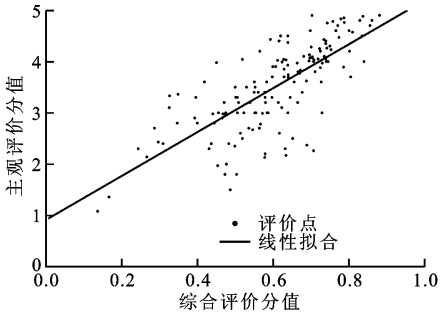


图 1 原图及算法处理后的图像

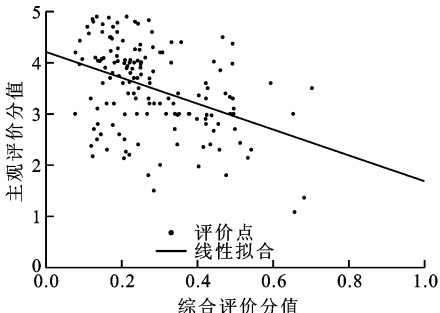
表 1 主观评价方法的评价尺度及分值			
质量级别	绝对尺度	相对尺度	评价分值
1	好	该组中最好的	5
2	较好	比平均水平好的	4
3	一般	该组的平均水平	3
4	较差	比平均水平差的	2
5	差	该组中最差的	1

步骤 2 采用本文方法对图像质量进行评价,得到

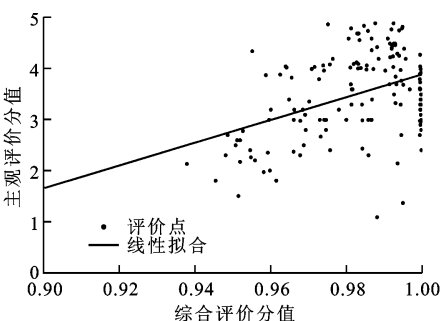
了每幅图像的评价分值,如图 2 所示。为了说明本文评价方法的质量评价指标,选取了峰值信噪比和结构相似度 2 种客观评价指标与本文方法的评价指标进行了对比。对 120 幅处理后的图像峰值信噪比和结构相似度使用线性拟合,建立了综合评价指标与主观评价分值之间的关系,如图 2b 和图 2c 所示。**步骤 3** 采用线性相关系数、绝对误差均值、均方根和 Spearman 等级相关系数作为质量评价指标,对图像的客观性能参数进行了评价(见表 2)。其中,线性相关系数表示评价的正确性,Spearman 等级相关系数表示单调性,绝对误差均值和均方根表示一致性,用于评价变量的离散程度。



(a) 本文方法评价指标



(b) 峰值信噪比评价指标



(c) 结构相似度评价指标

图 2 3 种评价指标与图像的主观评价分值的关系曲线

从直观上看,本文的综合评价分值与主观评价分值之间存在较强的线性关系,可以使用线性拟合

来建立数学模型。峰值信噪比的综合评价分值与主观评价分值组成的点分布较分散,没有明显的单调趋势,而结构相似度的综合评价分值与主观评价分值组成的点较高的区间无法区分不同质量的图像。

根据视频质量专家组织(VQEG)推荐的方法,对综合评价、峰值信噪比和结构相似度与主观评价分值的相关性进行了分析,结果如表 2 所示。从表数据上看,本文方法的各个质量评价指标均优于峰值信噪比和结构相似度。在线性相关系数方面,本文方法比峰值信噪比提升了 80.02%,比结构相似度提升了 78.85%;在绝对误差方面,本文方法比峰值信噪比提升了 3.96%,比结构相似度提高了 7.96 倍;在均方根方面,本文方法比峰值信噪比提升了 6.45%,比结构相似度提高了 8.37 倍;在 Spearman 等级相关系数方面,本文方法比峰值信噪比提高了 1.01 倍,比结构相似度提高了 1.69 倍,表明本文方法的单调性优于峰值信噪比和结构相似度。

表 2 3 种质量评价指标的性能参数

评价指标	线性相关系数	绝对误差均值	均方根	Spearman 等级相关系数
本文方法	0.741 7	0.115 6	0.145 3	0.758 9
峰值信噪比	-0.412 0	0.111 2	0.136 5	-0.378 5
结构相似度	0.414 7	0.012 9	0.015 5	0.281 6

5 结 论

本文通过对人眼视觉特性的分析,给出了位置影响因子、细节影响因子和灰度影响因子的定义。将这些影响因子作为人眼视觉特性的权重因子,分别对图像失真敏感度、失真度、信息熵、结构相似度进行了重构,并将重构的客观评价指标进行加权综合,作为符合人眼视觉特性的图像质量综合评价指标,对射线检测数字图像质量进行了评价。

将本文方法应用于射线检测数字图像的质量评价中,由于综合评价分值与主观评价分值之间具有较强的线性关系,因此本文方法可以准确地预测图像的质量。采用线性相关系数、绝对误差均值、均方根和 Spearman 等级相关系数作为性能评价指标,将本文方法的评价指标与峰值信噪比、结构相似度进行了比较,结果表明,本文方法评价指标的正确性、单调性和一致性均优于峰值信噪比、结构相似

度,因此更适用于射线检测数字图像的质量评价。

参考文献:

[1] SHEN Qingming, GAO Jianmin, LI Cheng. Adaptive segmentation of weld defects based on flooding [J]. Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2009, 51(10): 541-547.

[2] DAMERA V N, KITE T D, GEISLER W S, et al. Image quality assessment based on a degradation model [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2000, 9(4): 636-650.

[3] 周景超, 戴汝为, 肖柏华. 图像质量评价研究综述 [J]. 计算机科学, 2008, 35(7): 1-4.

ZHOU Jingchao, DAI Ruwei, XIAO Bohua. Overview of image quality assessment research [J]. Computer Science, 2008, 35(7): 1-4.

[4] 李航, 路羊, 崔慧娟, 等. 基于频域的结构相似度的图像质量评价方法 [J]. 清华大学学报:自然科学版, 2009, 49(4): 559-562.

LI Hang, LU Yang, CUI Huijuan, et al. Image quality assessment based on frequency domain of structural similarities [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2009, 49(4): 559-562.

[5] KARUNASEKERA S A, KINGSBURY N G. A distortion measure for blocking artifacts in images based on human visual sensitivity [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1995, 4(6): 713-724.

[6] 李晓晶. 图像质量评价与图像增强技术研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2008.

[7] WANG Z, SIMONCELLI E P, BOVIK A C. Multi-scale structural similarity for image quality assessment [C]//Conference Record of the Thirty-Seventh Asilomar Conference on Signal, Systems and Computers. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2003: 1398-1402.

[8] Video Quality Experts Group. Final report from the video quality experts group on the validation of objective models of video quality assessment [EB/OL]. (2003-08-10)[2012-11-15]. <http://www.vqeg.org>.

[9] 穆为磊, 高建民, 陈富民, 等. 符合人眼视觉特性的焊缝射线数字图像增强方法 [J]. 西安交通大学学报, 2012, 46(3): 90-93.

MU Weilei, GAO Jianmin, CHEN Fumin, et al. Weld radiographic image enhancement conforming to human visual system [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2012, 46(3): 90-93.

(编辑 管咏梅)