

图像增强在文物 X 光图像中的应用

相建凯^{1,2*}, 吴萌³, 王展^{1,2}, 甄刚^{1,2}, 马琳燕^{1,2}

¹砖石质文物保护国家文物局重点科研基地, 陕西 西安 710075;

²陕西省文物保护研究院, 陕西 西安 710075;

³西安建筑科技大学信息与控制工程学院, 陕西 西安 710055

摘要 基于高频强调滤波自适应直方图算法,参考医学 X 光图像处理方法,将数字图像增强技术引入到文物 X 光图像中。经过图像增强后,文物 X 光图像的边缘细节得到增强,对比度得到提高,有用信息更加凸显。结果表明该方法不但便于图像分析,还简化了整个检测过程。

关键词 X 射线光学; X 光照相; 文物; 图像增强; 数字成像技术

中图分类号 K876

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.063402

Application of Image Enhancement in X-Ray Photography of Cultural Relics

Xiang Jiankai^{1,2*}, Wu Meng³, Wang Zhan^{1,2}, Zhen Gang^{1,2}, Ma Linyan^{1,2}

¹Key Scientific Research Base on the Conservation of Stone and Brick Materials, State Administration of Cultural Heritage of China, Xi'an, Shaanxi 710075, China;

²Shaanxi Provincial Institute of Cultural Relics Protection, Xi'an, Shaanxi 710075, China;

³School of Information and Control Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China

Abstract Based on the high-frequency emphasis filtering and adaptive histogram algorithm, the digital image enhancement technology is introduced into the X-ray images of the cultural relics with reference to the medical X-ray image processing method. After image enhancement, the edges and details of the X-ray image of an artifact are enhanced, the contrast is stretched, and the useful information is clear. The results show that the proposed method not only facilitates the image analysis, but also simplifies the entire inspection process.

Key words X-ray optics; X-ray photography; cultural relics; image enhancement; digital imaging technology

OCIS codes 340.7440; 000.2850; 100.2980

1 引言

X 光照相作为一种传统的检测技术,能够揭示出文物的内部结构、制作工艺、保存状况以及修复历史等信息^[1-4],被广泛应于金属器、陶瓷器、泥塑、石刻、漆木器等文物的检测分析中^[4-8]。特别是随着数字成像技术的发展,X 光照相检测变得方便易行^[1,3,7-8],所得到的数字图像易于存储、传输、编辑和使用。

由于文物材质多样、器型多变、结构复杂,若要充分获得每件文物的结构信息,就需要 X 光照相获得的图像具有清晰的细节和较高的质量。但是由于受到材质和保存状况的限制,文物 X 光照相获得的原始图像的质量一般较差,简单地调整亮度和对比度很难满足要求。目前,国内外关于文物 X 光图像增强的研究鲜有报道,参考医学 X 光图像的处理方法^[9-14],本文尝试将数字图像增强技术引入文物的 X 光图像处理中。考虑到文物的复杂性,选用的图

收稿日期: 2018-08-23; 修回日期: 2018-09-14; 录用日期: 2018-10-19

基金项目: 国家自然科学基金(61701388)、陕西省教育厅专项(17JK0431)

* E-mail: xiangjk18@126.com

像增强算法不但应具有良好的增强效果,而且应具有较强的适应能力,一般单一的图像增强算法很难满足要求。本文采用高频强调滤波自适应直方图均衡化的方法,其增强效果可根据文物 X 光图像的实际情况通过改变参数进行调节。为验证该算法在文物 X 光图像增强中的适用性,特选取 3 种不同材质文物的 X 光图像进行实验。

2 图像增强算法

图像增强算法大致可分为两类:一类是空域法,一类是频域法。空域法是直接对图像的像素进行处理,是以灰度映射变换为基础。频域法则是先将图像进行某种变换(如傅里叶变换),然后对变换后的系数进行调整,最后再进行逆变换得到空域中的增强图像,它是一种间接处理方法。本文采用的算法是高频强调滤波自适应直方图均衡化的方法,是频域法中的高频强调滤波和空域法中的自适应直方图均衡化的综合算法。

2.1 自适应直方图均衡化

直方图均衡化的目的是使图像的直方图趋于均匀。因为从人眼的视觉特性来说,图像的直方图分布越均匀,图像的信息量就越大,整幅图像的色调也越协调。直方图均衡化的具体步骤参考文献[10]。

直方图均衡化也存在一个缺点,即出现频率较低的灰度级可能存在兼并现象。如果一些细节信息正好处在这些灰度级上,则这些细节可能被忽略。为了克服上面的缺点,将灰度变换的范围从整幅图像缩小到某一大小合适的窗口,这样就可以保留更多的细节信息。这种改进后的方法被称为自适应直方图均衡化^[11]。

2.2 高频强调滤波

在图像的频域增强算法中,图像被视为波。其中,高频波反映了图像的边缘、细节信息,也就是灰度变化明显的部分。低频波则反映了图像的轮廓信息,也就是灰度变化缓慢的部分(如文物厚度的变化)。对于文物 X 光图像增强来说,我们的目的主要是增强图像的边缘细节信息,同时适当地保留轮廓信息,两部分信息(高频波和低频波)对文物检测来说都是有用的。

高频强调滤波的原理参考文献[9,11]。本文使用的高通滤波器是布特沃斯高通滤波器,滤波传递函数的表达式为

$$H(u, v) = \frac{1}{1 + \left[\frac{D_0}{D(u, v)} \right]^{2n}}, \quad (1)$$

式中: D_0 为截止频率; $D(u, v)$ 为频率域内点 (u, v) 到滤波器中心的距离; n 为阶数。该滤波器的优点在于其在增强高频信号的同时也可以部分保留低频信号,且频率增强的范围和程度可以通过截止频率 D_0 和阶数 n 进行调节。

3 实验与结果

3.1 算法流程

1) 预处理。将原始图像中多余的背景裁切,剩余的背景像素灰度置 0,将背景噪声对图像增强的影响降到最低。

2) 高频强调滤波。选择布特沃斯滤波器作为高通滤波器,阶数 n 设定为 0.6,根据 X 光图像实际情况选择截止频率 D_0 。

3) 自适应直方图均衡化。通过参数调节直方图均衡化的窗口大小以及图像对比度和灰度范围。

3.2 实验结果和分析

本文分别对 3 种不同类型文物的 X 光图像进行增强,分别为汉代铜镜(金属材料)、商代陶片(非金属材料)和辽代泥塑(非金属材料的基体,基体含有金属材料结构)。原始图像均是由德国 DUERR 公司 CRNet/HD-CR 35 NDT Plus 型数字成像系统获得,数字图像均为 16 位灰度。铜镜和陶片 X 射线曝光使用的是意大利 GILARDONI 公司 ART-GIL350/6 型固定式探伤仪,工作电压范围为 95~350 kV,最大电流为 5 mA。泥塑 X 射线曝光使用的是大连西奥特 THX-3006TD 型便携式探伤仪,工作电压范围为 150~300 kV,工作电流为 5 mA。图像增强用基于 64 位操作系统的 MATLAB R2014a 软件实现。

3.2.1 铜镜 X 光图像增强结果

图 1 是一面汉代铜镜 X 光图像的增强效果图。该铜镜直径为 16.5 cm,镜缘厚约为 4.62 mm,内区厚约为 1.89 mm。X 射线曝光管电压为 150 kV,曝光管电流为 5 mA,曝光时间为 150 s,焦距为 80 cm。图 1(a)是经过多余背景裁切的原始图像。该图像存在 3 个问题:1) 由于该铜镜为典型的高厚度比样品,镜缘部分比其他部位厚很多。镜缘部分由于“欠曝”,纹饰和裂纹信息无法识别,传统的解决方法是增加曝光管电压,进行二次曝光,以获取镜缘部分信息。2) 由于 X 光照相不能像光学透镜那样聚焦,图像略显模糊^[11]。3) 曝光参数不是最佳的,图像的动态灰度范围小,对比度不高。

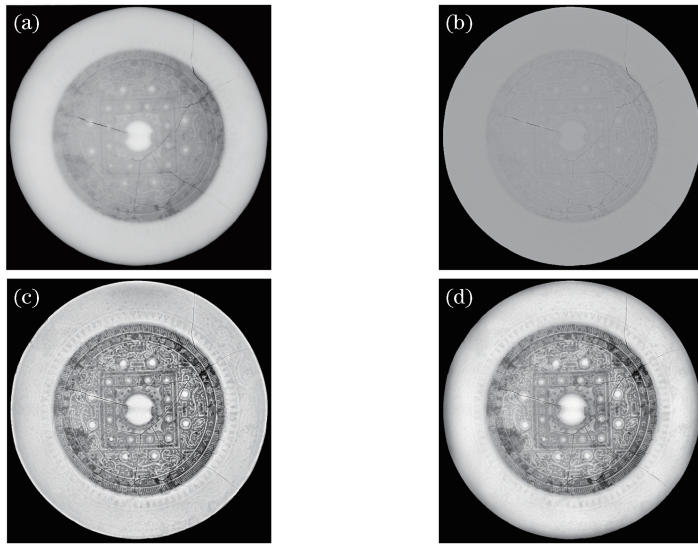


图1 铜镜 X 光图像增强过程。(a)原始图像;(b)高频强调滤波结果($D_0 = 200$);
(c)图(b)经自适应直方图均衡化后的结果($D_0 = 200$);(d)图像增强结果($D_0 = 500$)

Fig. 1 X-ray image enhancement process of bronze mirror. (a) Original image; (b) result of high-frequency emphasis filtering ($D_0 = 200$); (c) result of adaptive performing histogram on (b) ($D_0 = 200$); (d) result of image enhancement ($D_0 = 500$)

图1(b)是经过高频强调滤波得到的结果,其中截止频率 D_0 为200。该处理的目的是减少图像的低频信息(即铜镜的厚度信息),并相对地增大高频信息(即铜镜的纹饰、裂纹信息),这样就可以显示出铜镜各部位的信息,解决原图存在的第1个问题。同时,由于边缘、细节信息得到增强,图像变得更加清晰,也可部分地解决原图存在的第2个问题。由于图1(b)的动态灰度范围小,增强效果看不出来。图1(c)是在图1(b)的基础上经过自适应直方图均衡化处理后的结果。该处理的目的是使图像最大程度地利用不同灰度级,增大图像动态范围,提高图像对比度,使细节信息更加清晰,同时解决原图存在的第2个和第3个问题。可以看到,铜镜的镜缘以内部分的纹饰、铭文、裂纹等信息变得更加清晰,而且不均匀锈蚀的厚度变化信息也得到较好的保留。同时,铜镜的镜缘部分的纹饰也呈现出来,而且还发现了镜缘左侧的两条“暗纹”以及右下角裂纹的发育位置。这些信息,可以帮助了解铜镜的本来面貌和保存状况,对下一步保护工作具有一定的指导意义。

图1(d)是采用截止频率 D_0 为500的图像增强结果。可以看出,镜缘的纹饰不够清晰。由此可见,本文的增强算法中截止频率的选取非常重要。如果截止频率太大,则边缘细节信息增强不够;如果截止频率太小,则低频信息削弱过多,厚度变化信息不能被保留下来。截止频率的选择原则是在高频信息得

到足够增强的基础上尽可能多地保留低频信息。另外,阶数 n 的选取也同样重要,如果 n 太小,则高频信息增强慢,如果 n 太大,则容易产生振铃现象。与参考文献相比,本文所选择的阶数 n 较小就是为了保留足够多的低频信息。

3.2.2 陶片 X 光图像增强结果

图2是一片陶片的 X 光图像增强效果图。该陶片直径为16 cm,厚约为1 cm。X 射线曝光管电压为120 kV,曝光管电流为4.25 mA,曝光时间为90 s,焦距为80 cm。图2(a)是经过多余背景裁切后的原始图像。该图像最大的问题是对比度低,这是由陶片的材料决定的。X 光图像的对比度表达式为

$$\Delta D = \frac{0.434\mu G \cdot \Delta T}{1 + m}, \quad (2)$$

式中: ΔD 为 X 光图像的对比度, μ 为材料对 X 光的衰减系数, G 为成像板的对比度, ΔT 为某结构(如纹饰、锈蚀等)在射线透照方向上的尺寸, m 为射线的散射比。衰减系数 μ 由 X 射线的能量和样品的材质决定,X 射线的能量(管电压)越小、样品材料的原子序数越大,则 μ 越大, ΔD 也越大,反之亦然。同时,样品中某种结构的 ΔT 越大,图像的对比度 ΔD 也越大。具体到陶片,其基体材料与麝和料颗粒材料对 X 光的衰减系数都很小,而且非常接近,因此这张 X 光图像对比度小,麝和料颗粒等有用信

息很难从图像中分辨出来。这一问题的传统解决方法是经过反复实验,用尽可能低的能量(μ 尽可能大)进行X射线曝光,以得到对比度大的X光图像。

图2(b)是经过高频强调滤波自适应直方图均衡化后的结果,截止频率 D_0 为500。图像中的细节

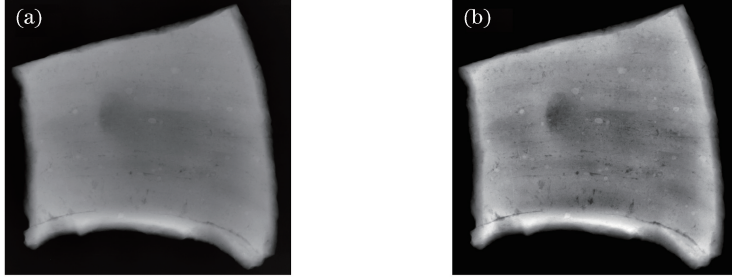


图2 陶片在图像增强前后的X光图像。(a)原始图像;(b)增强后图像

Fig. 2 X-ray images of ceramic shard before and after image enhancement. (a) Original image; (b) enhanced image

3.2.3 泥塑X光图像增强结果

图3是一尊泥塑肩部X光图像增强的效果图。该泥塑高约为2 m,最大厚度可达35 cm。X射线曝光管电压为235 kV,曝光管电流为5 mA,曝光时间为180 s,焦距为110 cm。图3(a)是经过了多余背景裁切后的原始图像。对于泥塑而言,其基体材料为草拌泥,对X光的衰减系数 μ 较小,因此这张X光图像整体对比度不高。另外,最想得到的内部结构(如木骨架、金属连接件)的 ΔT 很小(与泥塑厚度相比),因此这些信息的对比度更小,很容易淹没在泥层厚度信息中,从而导致误判。传统方法很难解

信息得到了增强,龕和料颗粒、泥条缝隙以及制作时留下的指痕都变得清晰,这些信息对于研究古陶器的制作工艺大有裨益。与铜镜相比,陶片X光图像增强时选取的截止频率 D_0 从200增加到500,这是为了保留图像中心位置的指痕。

决这一问题。

图3(b)是经过高频强调滤波自适应直方图均衡化后的结果,截止频率 D_0 为500。可以看出,该泥塑中的泥层开裂、手臂的木骨架(手臂影像中的暗区)和粗铁丝(手臂中的粗亮线)以及泥塑胸部金属连接部件等信息都更加明显。另外,还可以发现木骨架与粗铁丝之间用细铁丝固定,位于在图像左边缘的中间,即泥塑胸部中间还有一枚外圆内方的古钱币。以上信息对于了解该泥塑的制作工艺、修复历史和保存状况都大有帮助,还可为后期制定保护方案提供依据。

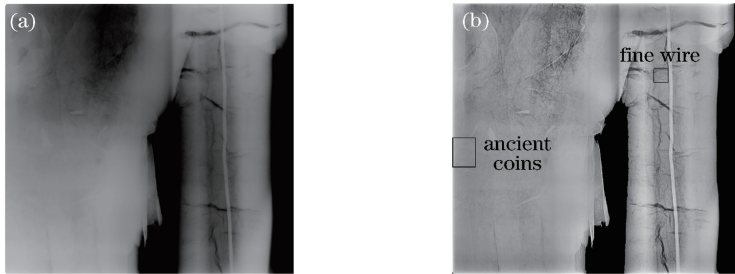


图3 泥塑(肩部)在图像增强前后的X光图像。(a)原始图像;(b)增强后的图像

Fig. 3 X-ray images of clay sculpture (shoulder) before and after image enhancement.

(a) Original image; (b) enhanced image

3.3 算法客观评价

为客观评价图像增强的效果,从平均灰度梯度和信息熵两个参量着手对图像增加后的图像加以分析。

3.3.1 灰度平均梯度

图像的灰度平均梯度(GMG)反映图像的对比度和纹理变化特征。GMG值越大,灰度变化越明显,图像也就越清晰,其定义可参考文献[9]。表1列出了3张X光图像增强前后的灰度平均梯度,可

表1 X光图像增强前后的GMG值

Table 1 GMG values of X-ray images before and after enhancement

X-ray image	Bronze mirror	Ceramic shard	Clay sculpture
Original image	0.1577	0.1223	0.0788
Enhanced image	0.6619	1.5854	0.8560

以看出,3张X光图像经过图像增强后,灰度平均梯度都有了较大提高,图像对比度有了大幅提高。

3.3.2 图像信息熵

图像的信息熵(IE)描述了图像平均信息量的多少。IE值越大,图像细节信息就越丰富,所含信息量也就越大,IE的定义见文献[12]。表2列出了3张X光图像增强前后的信息熵,可以看出,3张X光图像经过图像增强后的信息熵都有了一定的提

表2 图像增强前后X光图像的信息熵值

Table 2 IE values of X-ray images before and after image enhancement

X-ray image	Bronze	Ceramic	Clay
	mirror	shard	sculpture
Original image	10.7022	6.2308	6.9654
Enhanced image	11.9847	10.6347	12.9535

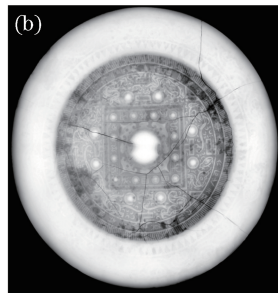
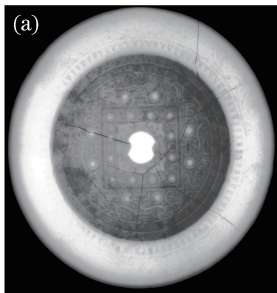


图4 不同算法下铜镜的增强结果。(a)直方图均衡化;(b)拉普拉斯滤波

Fig. 4 Enhancement results of bronze mirror by different algorithms. (a) Histogram equalization; (b) Laplace filter

表3 3种算法的图像增强效果的对比

Table 3 Comparison of image enhancement effects by three enhancement algorithms

Parameter	Original	Histogram	Laplace	Proposed
	image	equalization	filter	algorithm
GMG	0.1577	0.2133	0.5734	0.6619
IE / (bit · pixel ⁻¹)	10.7022	4.8537	11.4496	11.9847

4 结 论

将数字图像增强技术应用于文物的X光图像中,采用高频增强滤波自适应直方图均衡化的算法对3张文物X光图像进行了处理。经过处理,图像的灰度平均梯度和信息熵都有了较大提高。处理后图像的边缘、细节信息得到了增强,轮廓信息也有一定程度的保留,文物的有用信息得到了充分展现。数字图像增强技术的应用不但降低了后期X光图像的分析难度,而且避免了多次曝光,为文物X光照相检测中存在的一些难题提供了解决途径。

在本文的图像增强算法中,阶数 n 和截止频率 D 是关键参数,应根据文物和X光图像的实际情况以及检测目的进行选择。与其他算法相比,本文

高,图像中可识别的信息更多。

3.3.3 几种增强算法的对比

作为对比,对图1(a)中的铜镜原始X光图像分别进行了直方图均衡化和拉普拉斯滤波,如图4所示。在图4(a)中,虽然镜缘的有些地方的纹饰被显示出来,但镜缘的左边和右下角的纹饰却由于灰度级合并而不能被显示出来。在图4(b)中,由于细节信息增强不够,镜缘部分的纹饰信息全部都没有表现出来。表3中的数据显示,3种图像增强算法相比,本文所提出的算法对铜镜X光图像的灰度平均梯度和信息熵提高最明显,图像增强效果最佳。

提出的算法具有良好的增强效果和较强的适应能力,非常适合在文物X光图像中应用。

参 考 文 献

- [1] Xiang J K, Zhang G, Dong S H, *et al.* Application of digital radiography to the research on wood carving [J]. *Sciences of Conservation and Archaeology*, 2018, 30(3): 103-108.
相建凯, 张刚, 董少华, 等. 数字X光照相技术在木雕造像上的应用[J]. *文物保护与考古科学*, 2018, 30(3): 103-108.
- [2] Hu D B, Lü S X. Application of X-ray photography in the research of the bronzes unearthed from the Jin marquis cemetery [J]. *Ancient Civilizations*, 2013, 9: 55-81.
胡东波, 吕淑贤. 应用X射线成像对晋侯墓地出土青铜器铸造工艺的研究[J]. *古代文明*, 2013, 9: 55-81.
- [3] Xie J, Yan W X. Application and prospect of X-ray imaging technology in conservation of unearthed bronzes [J]. *World of Antiquity*, 2016(2): 74-77.
谢晋, 闫文祥. 馆藏出土青铜器保护中的X射线成像技术的应用及展望[J]. *文物世界*, 2016(2): 74-

- 77.
- [4] Hu D B. The X-ray imaging of cultural relics [M]. Beijing: Science Press, 2012: 55-161.
胡东波. 文物的 X 射线成像 [M]. 北京: 科学出版社, 2012: 55-161.
- [5] Yang J C, Han R B. The application of X-rays photography in the study of cultural relics and archaeology [J]. Sciences of Conservation & Archaeology, 2001, 13(1): 55-60.
杨军昌, 韩汝玢. X 光照相技术在文物及考古学研究中的应用 [J]. 文物保护与考古科学, 2001, 13(1): 55-60.
- [6] Ding Z M, Wu L M, Kong F G. X-ray radiography in scientific conservation [J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2006, 18(1): 38-46.
丁忠明, 吴来明, 孔凡公. 文物保护科技研究中的 X 射线照相技术 [J]. 文物保护与考古科学, 2006, 18(1): 38-46.
- [7] Zhou H, Yang M, Gao F, *et al.* Application of portable X-ray radiography to assess the weathering condition of the Avalokitesvara sculpture in Dazu Rock Carvings [J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2012, 24(4): 45-54.
周华, 杨森, 高峰, 等. 重庆大足千手观音便携 X 探伤调查及初步研究 [J]. 文物保护与考古科学, 2012, 24(4): 45-54.
- [8] Zhou H, Yang M, Gao F, *et al.* Latest progress in non-destructive ray radiography detection in archaeological sites [J]. Dunhuang Research, 2013(1): 35-43.
周华, 杨森, 高峰, 等. 射线探伤无损检测方法在文物考古现场应用最新进展 [J]. 敦煌研究, 2013(1): 35-43.
- [9] He W. Medical X-ray image enhancement algorithm based on the high frequency emphasis filtering [J]. Information Technology, 2015, 39(4): 60-62, 66.
何文. 基于高频强调滤波的医学 X 光图像增强算法 [J]. 信息技术, 2015, 39(4): 60-62, 66.
- [10] Wu S B, Wang Y, Xie Y Q. Contrast enhancement of medical X-ray images based on multiscale limited adaptive histogram equalization and mathematical morphology [J]. Journal of Integration Technology, 2014, 3(1): 38-45.
伍世宾, 王玥, 谢耀钦. 基于多尺度带限的自适应直方图均衡和数学形态学的医学 X 射线图像对比度增强算法 [J]. 集成技术, 2014, 3(1): 38-45.
- [11] Gonzalez R C, Woods R E, Eddins S L. Digital image processing using MATLAB [M]. Ruan Q Q, Transl. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2013: 25-122.
Gonzalez R C, Woods R E, Eddins S L. 数字图像处理实现的 MATLAB 实现 [M]. 阮秋琦, 译. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2013: 25-122.
- [12] Xiong J, Han L N, Geng G H, *et al.* Digital medical image enhanced by similar method of Retinex [J]. Computer Engineering and Applications, 2009, 45(24): 14-16, 20.
熊杰, 韩丽娜, 耿国华, 等. 使用类似 Retinex 方法增强数字医学图像 [J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(24): 14-16, 20.
- [13] Zhou F, Jia Z H, Yang J, *et al.* Medical image enhancement method based on improved Gamma correction in shearlet domain [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2017, 28(5): 566-572.
周飞, 贾振红, 杨杰, 等. 基于剪切波域改进 Gamma 校正的医学图像增强算法 [J]. 光电子 • 激光, 2017, 28(5): 566-572.
- [14] Song L, Feng Y P, Wei Y B. Gray level DAG maximum entropy based on quantization resolution for medical image tone enhancement [J]. Journal of Sichuan University (Natural Science Edition), 2018, 55(2): 316-322.
宋璐, 冯艳平, 卫亚博. 基于灰度 DAG 熵最大化量化分辨率医学图像增强 [J]. 四川大学学报(自然科学版), 2018, 55(2): 316-322.