

同步辐射 X 射线图像对比度增强算法研究

梁传晖^{1,2} 王玉丹¹ 杜国浩¹ 邓彪¹ 谢红兰¹ 肖体乔¹

¹中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201800

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 在同步辐射 X 射线成像中,时常会出现对比度不高或对比度不均匀的问题,这将导致图像中样品的一些细节信息难以被观察和分析。针对这一问题,提出一种 X 射线图像对比度增强的算法。该算法以同态滤波为核心,结合图像降噪预处理及灰度调整,以现图像的对比度增强,并提高图像质量。编写程序实现该算法,并通过分辨率靶图像和海洋鱼类样品的 X 射线图像进行测试。结果表明,该算法可以很好地增强灰度分布不均匀的低对比度 X 射线图像,使样品信息显示更清晰,灰度分布更均匀。同时,对 X 射线图像的降噪效果明显。

关键词 图像处理;对比度增强;同态滤波;同步辐射;X 射线成像

中图分类号 TP751.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0310003

Research on the Contrast Enhancement Algorithm of Synchrotron Radiation X-Ray Image

Liang Chuanhui^{1,2} Wang Yudan¹ Du Guohao¹ Deng Biao¹ Xie Honglan¹ Xiao Tiqiao¹

¹Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In the process of synchrotron radiation X-ray imaging, the X-ray image with lower or uneven contrast is obtained invariably, this causes some details of the sample in the image are difficult to observe and analyze. In order to solve the problem, a new algorithm is proposed to enhance the X-ray image and get a higher contrast. The algorithm is based on homomorphic filtering, and combined with image denoising pretreatment and gray level adjustment, so that the contrast can be enhanced and the image quality can be improved simultaneously. Furthermore, the algorithm is realized by writing program, and the X-ray images of a resolution target and marine fish are utilized to test the performance of the proposed algorithm. The results show that the proposed algorithm can well enhance the low contrast X-ray images with uneven distribution of gray level, and show the sample detail information more clearly, the gray level distributes more equably. Concurrently, the effect of X-ray image denoising is obvious.

Key words image processing; contrast enhancement; homomorphic filtering; synchrotron radiation; X-ray imaging

OCIS codes 100.2000; 100.3008; 100.2980; 340.6720

1 引言

近年来,由于同步辐射光源的优良性能^[1],其科学应用范围越来越广,深入到科学研究的方方面面^[2-7]。在同步辐射 X 射线成像过程中,针对具有不同特征信息的样品选取不同的 X 射线入射光子能量。对于有些样品,X 射线的穿透率会很高,得到的 X 射线图像上的背景点和样品点的灰度反差很小,使图像对比度降低,

收稿日期: 2014-10-24; 收到修改稿日期: 2014-12-09

基金项目: 国家自然科学基金(81430087, 11275257, 11405260)、国家973项目(2010CB834301)、CAS-CSIRO 合作项目(GJHZ1303)

作者简介: 梁传晖(1990—),男,硕士研究生,主要从事数字图像处理算法方面的研究。E-mail: liangchuanhui@sinap.ac.cn

导师简介: 肖体乔(1966—),男,研究员,博士生导师,主要从事成像光学和 X 射线光学方面的研究。

E-mail: tqxiao@sinap.ac.cn(通信联系人)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

导致样品信息不能被完全观察到。并且由于同步辐射光的高斯分布特性,使得图像灰度分布不均匀。为解决上述问题,可以通过对比度增强的图像处理方法,获得对比度较高且灰度分布均匀的图像。

传统的对比度增强方法有很多,但是这些常规的基于图像灰度的增强方法都存在一定的缺陷,没有很好地利用人类视觉特性,比如,灰度变换对于灰度等级较丰富的图像很难获得好较的增强效果,直方图均衡化或规定化方法中使用的直方图对图像信息的描述不够充分。

Land等^[8]通过对复杂的人类彩色恒常性现象研究,提出Retinex照射反射模型。Jobson等^[9-11]以此为基础,发展了单尺度Retinex(SSR)、多尺度Retinex(MSR)和多尺度Retinex彩色恢复(MSRCR)算法,但是这类Retinex算法仅对彩色图像的增强具有较好结果。Pal等^[12-13]提出的基于模糊集合论的图像增强方法,会丢失部分图像细节。另外一种带通的Gabor滤波器,与人类视觉接收场模型相吻合^[14]。Gabor^[15]函数是由Gabor首先定义的,而后由Daugman^[16]将其扩展成二维结构,是唯一能够达到空域和频域联合测不准关系下界的函数^[17]。二维Gabor滤波器具有在空间域和频率域同时取得最优局部化的特性,应用广泛^[18-22]。但是,针对空间尺度及方向参数的确定目前还没有很有效的方法,所以很难控制Gabor滤波器对X射线图像增强的效果。

在50年代末60年代初,非线性滤波理论得到很大发展,并且为离散非线性滤波和连续非线性滤波奠定了重要的理论基础。在这种研究背景下,同态滤波技术作为信号分离领域内的一个分支逐渐发展起来,并获得了越来越广泛的关注,其基本滤波原理是将非线性组合的信号转化到线性域内,再进一步做相应的线性滤波处理。同态滤波技术已经广泛应用于图像处理、语音识别、声纳、雷达、生物医学工程及地震勘探等诸多领域^[23-26]。基于图像的照度/反射率模型的同态滤波,符合人眼对于亮度响应的非线性特性,对于图像的对比度增强具有很好的效果。

由于同步辐射X射线源的高斯分布特性,使获得的低对比度X射线图像灰度分布不均匀,而同态滤波在增强图像的同时,可以解决图像光照非均衡的校正问题。所以基于人类视觉特性的同态滤波作为算法的核心,结合图像降噪的方法来实现图像对比度增强,并将实验结果与直方图均衡化方法进行对比。

2 图像增强算法

算法实现流程如图1所示。首先对于输入的X射线图像进行降噪预处理,降低图像中的随机噪声影响;其次通过直方图均衡化或灰度变换对整体灰度值低、样品细节难以观察的图像进行灰度调整;最后利用同态滤波进行对比度增强,可以减弱因同步辐射光源的高斯分布特性对X射线图像产生的照度不均匀的影响,提升图像信号强度,并且增强图像细节。

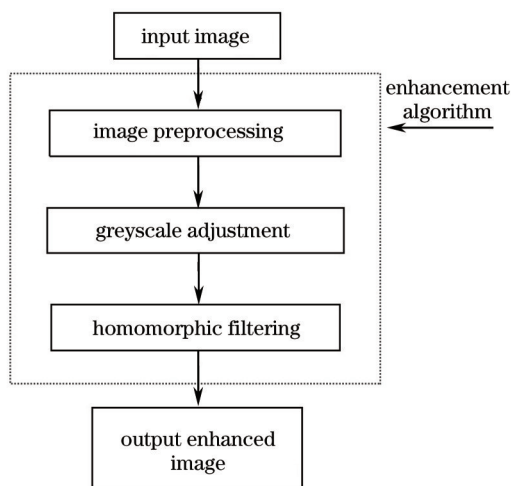


图1 图像对比度增强算法实现流程

Fig.1 Diagram of implementing the image contrast enhancement algorithm

图像对比度的计算采用Peli于1990年提出的均方根(RMS)对比度计算方法^[27-29],并进行归一化,使对比度的取值范围限定在(0,1)之间,可表示为

$$C_{\text{RMS}} = \frac{\left\{ \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N f^2(i,j) - \left[\frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N f(i,j) \right]^2 \right\}^{1/2}}{\frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N f(i,j)}, \quad (1)$$

式中待处理图像 $f(i,j)$ 的尺寸为 $M \text{ pixel} \times N \text{ pixel}$,计算得到的X射线图像对比度为 C_{RMS} 。

另外一种基于视觉能见度的 Michelson 对比度计算公式为

$$C_{\text{M}} = \frac{g_{\text{max}} - g_{\text{min}}}{g_{\text{max}} + g_{\text{min}}}, \quad (2)$$

式中 g_{max} 和 g_{min} 分别为图像中最高亮度和最低亮度的灰度值。本文以对对比度 C_{RMS} 和 C_{M} 的变化作为图像对比度增强的依据。

2.1 图像预处理

在采样、量化获取数字X射线图像的过程中,会有多种噪声源产生的噪声污染图像,因此需对数字图像进行降噪处理。先对图像进行减背景处理^[30],去除背景噪声和暗电流的影响;其次选择滤波器对图像进行平滑处理,降低噪声。高斯滤波和低通滤波均为平滑滤波器,可以容许低于滤波器截止频率的信息通过,并衰减高于截止频率的信息。而噪声一般处于高频段,可以被平滑滤除。本文用高斯滤波和低通滤波对实验图像进行降噪预处理,用星形条形靶经过同步辐射X射线成像获得实验图像,如图2(a)所示,图2(b)为降噪后图像。为分析降噪结果,在图2两张图中分别取一条灰度轮廓图,如图2中红线所示。红线处的灰度轮廓图如图3所示,蓝、红色曲线分别代表降噪之前和降噪后图像的灰度轮廓图。从图3中可以看出滤波后降噪效果明显,噪声的尖峰得到很好的抑制。

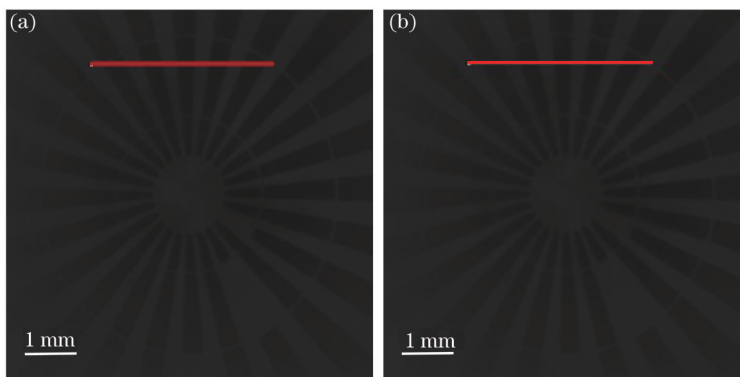


图2 降噪预处理图像。(a)原始X射线图像;(b)降噪后图像

Fig.2 Image denoising preprocess. (a) Original X-ray image; (b) image denoising

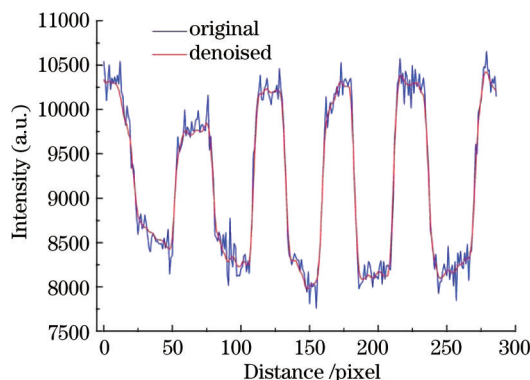


图3 降噪效果对比图

Fig.3 Comparison of noise reduction result

2.2 对比度增强

2.2.1 灰度调整

图像经过降噪处理以后,图像整体灰度依然很低,为了能够看到样品细节,对图像灰度做调整。分别对图2(b)进行直方图均衡化和灰度线性变换处理,处理后的结果如图4所示。相对于图4(b)中利用直方图均衡化方法处理的结果而言,图4(a)中经过灰度变换后的图像整体灰度比较均匀,因此采用灰度变换方法对降噪后的图像进行灰度调整。

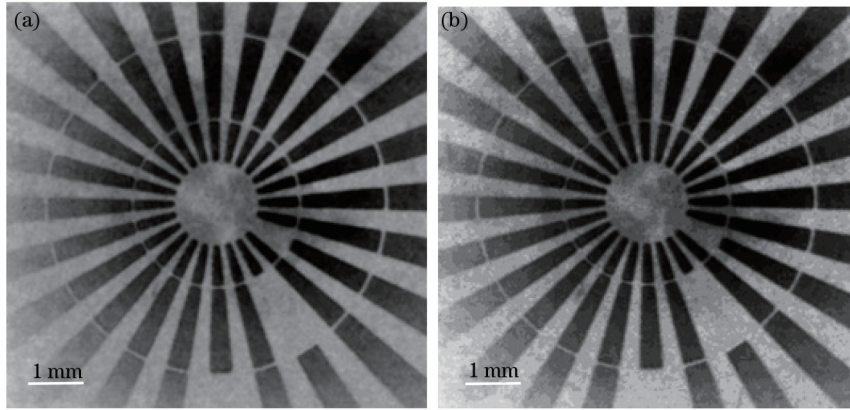


图4 灰度调整图像。(a)灰度变换;(b)直方图均衡化

Fig.4 Greyscale adjustment image. (a) Gray level transformation; (b) histogram equalization

降噪图像进行灰度调整前后的灰度直方图如图5所示,图5(a)为降噪后图像的灰度直方图,可见其灰度动态范围很小,且在低灰度区。经过灰度调整之后图像的灰度直方图如图5(b)所示,其灰度动态范围更大,且在整个区域中都有分布,使原本很暗的图像变亮,并且其对比度得到提升,如图6所示。

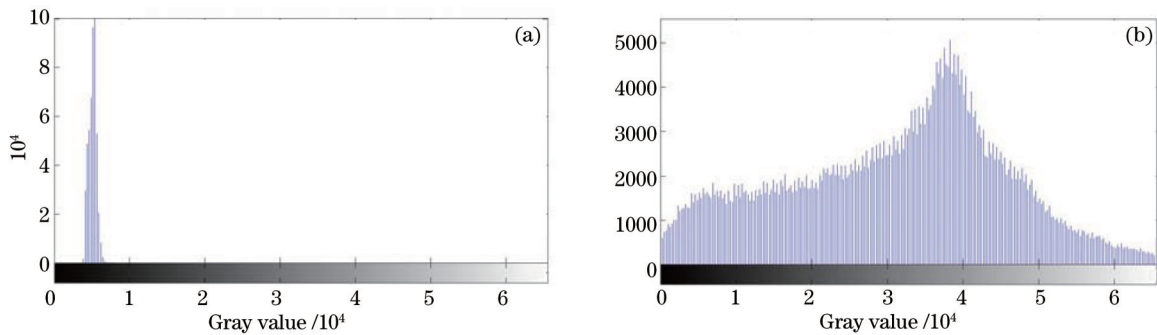


图5 图像的灰度直方图。(a)灰度调整前;(b)灰度调整后

Fig.5 Gray histogram of images. (a) Before greyscale adjustment; (b) after greyscale adjustment

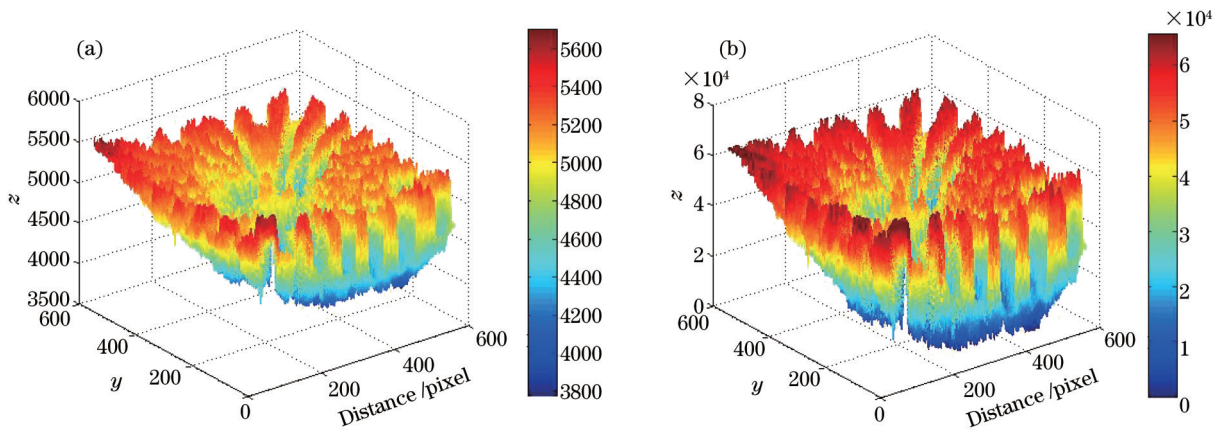


图6 图像的三维灰度显示。(a)灰度调整前;(b)灰度调整后

Fig.6 Three-dimension gray display of images. (a) Before greyscale adjustment; (b) after greyscale adjustment

2.2.2 同态滤波

同态滤波是基于图像的照度/反射率模型。假设图像是由光的反射形成,则同步辐射 X 射线图像的数学模型为

$$f(x,y) = r(x,y) \times i(x,y), \quad (3)$$

式中 $i(x,y)$ 为均匀的或缓变的同步辐射 X 射线照度分量,其频谱在低频区域;反射分量 $r(x,y)$ 反映样品的内容,随细节而变化,其频谱大部分在高频区域。同态滤波充分考虑该成像原理,通过对同步辐射 X 射线照度分量的高通滤波,消除入射光不均匀照明对成像的影响,把频率滤波和灰度变换结合起来处理图像,达到图像对比度增强的目的。其基本步骤如下^[31]:

- 1) 对图像的数学模型进行对数运算,得到分离的反射分量和照度分量,

$$\ln[f(x,y)] = \ln[r(x,y)] + \ln[i(x,y)].$$

- 2) 对 $\ln[f(x,y)]$ 进行傅里叶变换,将图像转换到频域,

$$\mathfrak{F}\{\ln[f(x,y)]\} = \mathfrak{F}\{\ln[r(x,y)]\} + \mathfrak{F}\{\ln[i(x,y)]\},$$

得到 $F(u,v) = R(u,v) + I(u,v)$.

- 3) 利用高通滤波器 $H(u,v)$ 对 $F(u,v)$ 进行滤波处理,可以衰减样品中表征低频结构信息 $I(u,v)$ 的照度分量,同时提升表征高频信息 $R(u,v)$ 的反射分量,得到滤波后的频域系数,

$$S(u,v) = H(u,v)F(u,v) = H(u,v)R(u,v) + H(u,v)I(u,v).$$

- 4) 对 $S(u,v)$ 进行傅里叶逆变换,得到空域中的 $s(x,y)$,

$$s(x,y) = \mathfrak{F}^{-1}[S(u,v)] = \mathfrak{F}^{-1}[H(u,v)R(u,v)] + \mathfrak{F}^{-1}[H(u,v)I(u,v)].$$

- 5) 对 $s(x,y)$ 进行取指数运算,就可以得到经过同态滤波后的图像 $g(x,y)$,

$$g(x,y) = \exp[s(x,y)].$$

利用上述步骤对经过灰度调整后的图像进行同态滤波,得到滤波后图像如下图 7(a)所示,图 7 (b)为其灰度三维(3D)显示。从图 7(b)中可以看出,图像经过同态滤波后的亮区灰度值比滤波前提升了两个量级,为 10^6 。而图 6(b)显示同态滤波前的灰度为 10^4 。同态滤波后图像的暗区灰度值接近于 0,而在进行对比度增强之前,其灰度值为 10^3 。由于同态滤波是在变换后的频率域中进行高通滤波,则对于 X 射线图像的噪声有一定的平滑作用,使噪声得到了进一步的减弱。

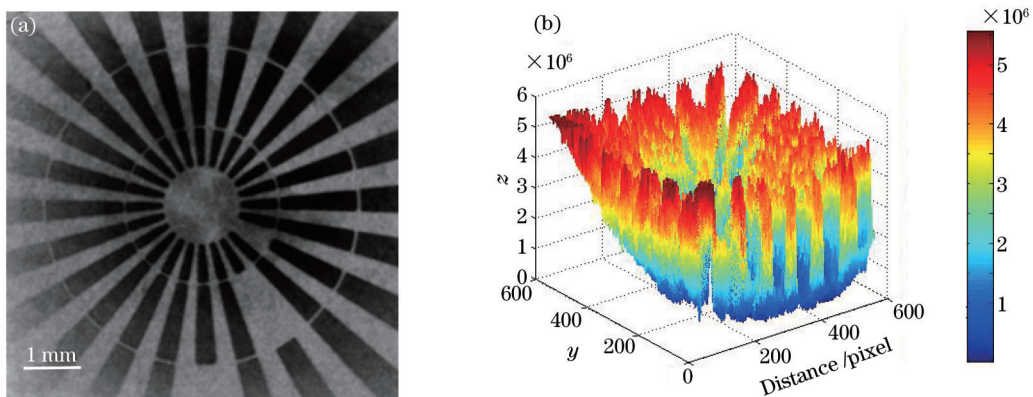


图 7 同态滤波处理。(a)处理后的 X 射线图像;(b)图像的三维灰度显示

Fig.7 Homomorphic filtering. (a) Homomorphic filtering X-ray image; (b) 3D gray display of images

通过(1)式和(2)式对增强处理前后的图像[图 2(a)和图 7(a)]分别进行对比度计算,其结果如表 1 所示。结果表明,经过对比度增强算法处理之后,X 射线图像的对比度得到了很大的提高。

表 1 增强处理前后图像的对比度

Table 1 Contrast of enhanced image before and after processing

Image	Original	Contrast-enhanced
C_{RMS}	0.1025	0.6129
C_M	8.8%	80%

3 实验结果与分析

3.1 分辨率靶测试

分辨率靶是一种有等宽度的黑白相间条纹成像的分辨率测试靶,具有从低频到高频的多种频率,黑白条纹一个空间周期的倒数为空间频率。根据图像对比度的另外一种计算方式,即(2)式,通过分辨率靶来计算调制制度,可以测试算法的对比度增强效果^[32]。(2)式中 g_{max} 为分辨率靶图像中白条纹的灰度值, g_{min} 为黑条纹的灰度值。利用本文算法进行对比度增强的效果如图8所示,图8(a)为原始分辨率靶图像,经过算法处理后得到对比度增强图像如图8(b)所示,其截止频率均在 $1/3 \mu\text{m}/\text{lp}$ 处,可测的空间周期在 $3\sim 15 \mu\text{m}/\text{lp}$ 之间。取图8(a)和(b)中周期为 $10 \mu\text{m}/\text{lp}$ 的红线所示的灰度轮廓图,显示本文算法处理前后图像的噪声对比,如图8(c)和(d)所示,可见经过本文算法处理后可以很好地抑制原始图像的噪声,使最后输出的图像噪声很小。

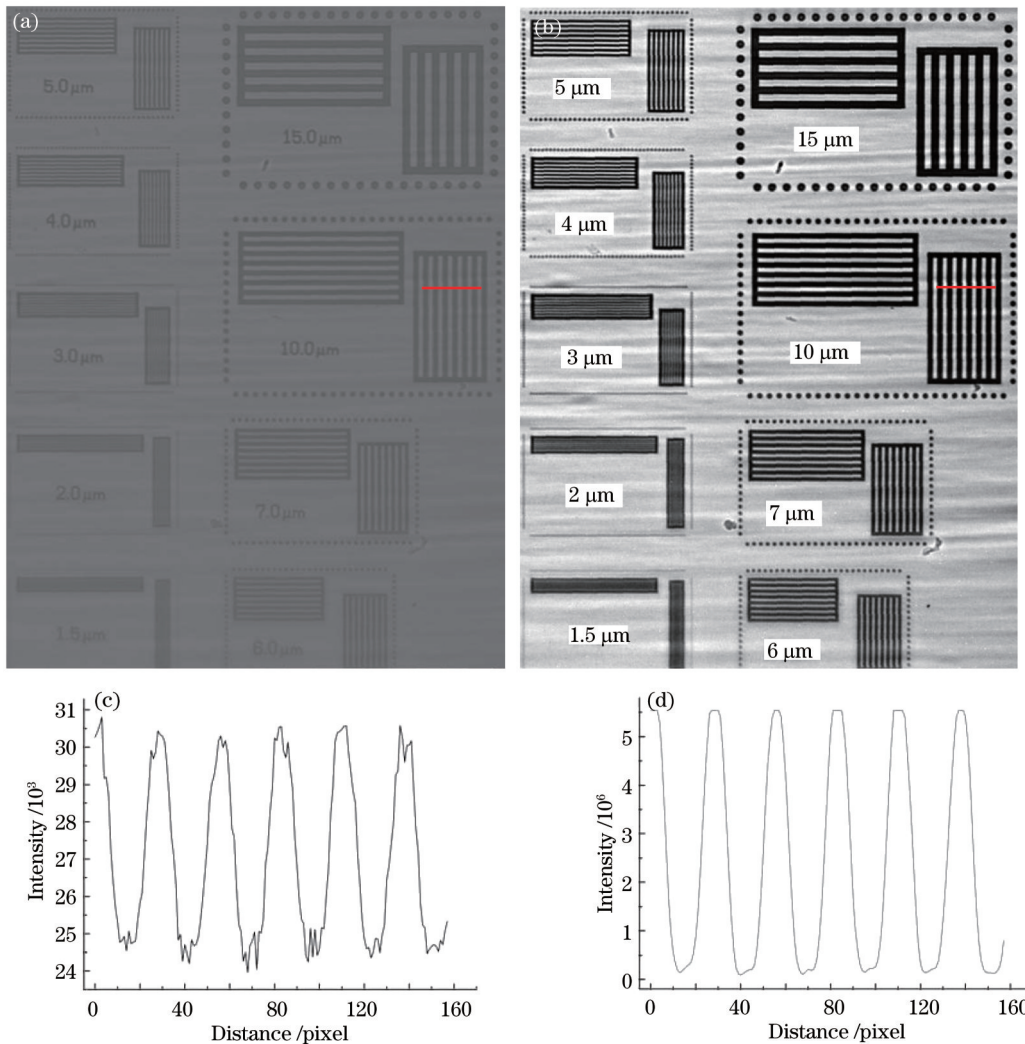


图 8 分辨率靶测试图像。(a)原始图像;(b)对比度增强图像;(c)原始图像灰度曲线;(d)处理后图像灰度曲线

Fig.8 Testing images of resolution target. (a) Original image; (b) contrast-enhanced image; (c) line profile of original image; (d) line profile of contrast-enhanced image

根据(2)式,依次求出在不同空间周期下原始图像和利用本文算法处理后图像的对比度,并计算对比度增强的倍数 M ,即

$$M = C_{CTF-Original} / C_{CTF-Processed}, \quad (4)$$

式中 $C_{CTF-Original}$ 和 $C_{CTF-Processed}$ 分别为算法处理之前和处理后同一空间周期下的对比度。得到本文算法对不同空间周期的对比度增强效果如图9所示,其中“×”点为不同空间周期的原始倍数 M 值,经过高斯拟合,得到虚线所示的拟合曲线,拟合过程中的均方根误差为0.0024。在空间周期为 $7 \mu\text{m}/\text{lp}$ 时,本文算法的对比度增强效果最好,增强后图像的对比度是原始图像对比度的14倍。另外,在测频率范围内的其他空间频率下的对比度增强效果也很明显,均达到9.5倍以上。本文算法对样品图像对比度的增强效果随着样品结构信息空间频率的降低而减弱,对于样品更低频率的大尺度结构信息,该算法可以使样品结构的整体灰度分布均匀,但只对结构的边缘具有一定的增强效果。

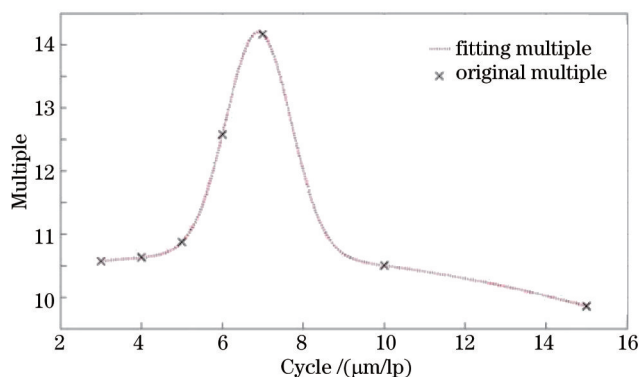


图9 不同空间周期的对比度增强效果

Fig.9 Enhancement effect of different space cycles

3.2 样品测试

用3条不同的海洋小鱼作为样品,进行X射线成像,得到小鱼样品的X射线图像如图10(a)、图11(a)、图12(a)所示。对3种样品的X射线图像分别利用本文算法进行对比度增强处理,得到增强后的图像,如图10(b)、图11(b)、图12(b)所示。最后对3个样品的原始X射线图像进行降噪预处理后用直方图均衡化来增强对比度,得到增强后的图像如图10(c)、图11(c)、图12(c)所示。通过计算处理前后的图像的对比度、标准差、信息熵3种参

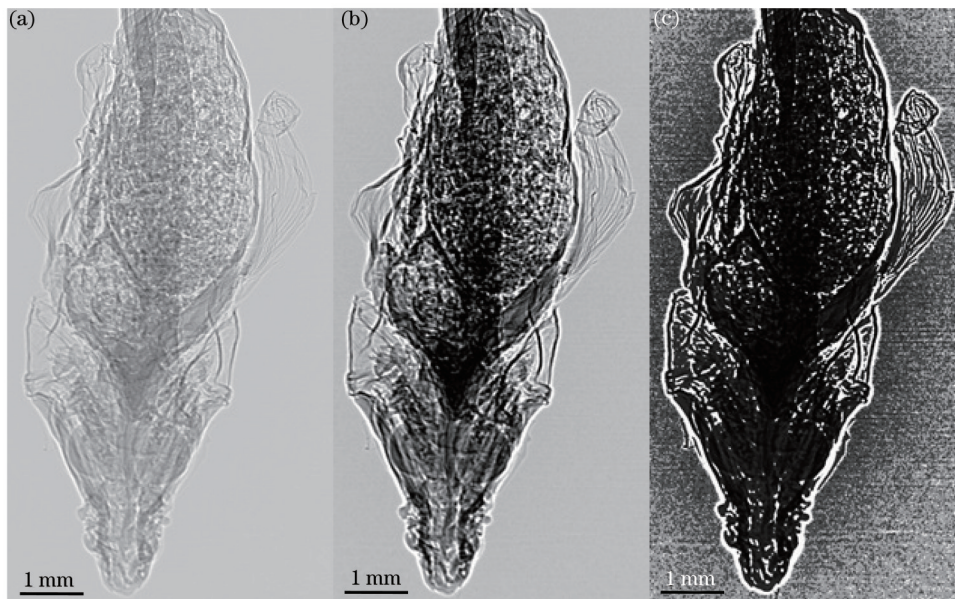


图10 1号小鱼样品测试图像。(a)原始图像;(b)本文算法增强图像;(c)直方图均衡化增强图像

Fig.10 Testing images of fish 1. (a) Original image; (b) enhanced image of the proposed algorithm; (c) enhanced image of histogram equalization

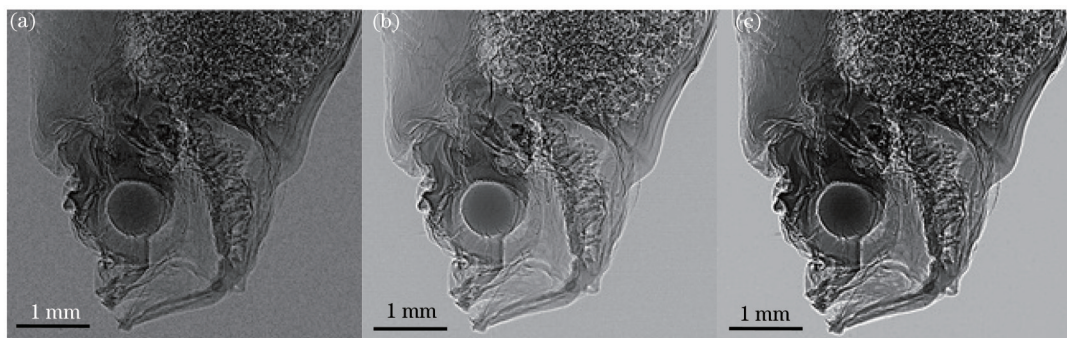


图 11 2号小鱼样品测试图像。(a)原始图像;(b)本文算法增强图像;(c)直方图均衡化增强图像

Fig.11 Testing images of fish 2. (a) Original image; (b) enhanced image of the proposed algorithm; (c) enhanced image of histogram equalization

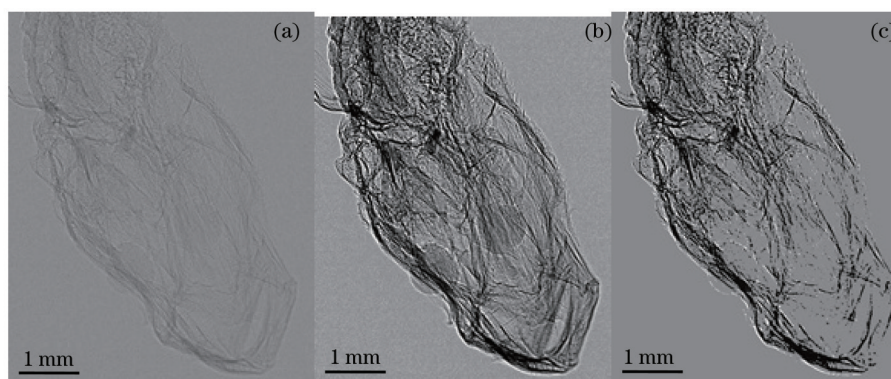


图 12 3号小鱼样品测试图像。(a)原始图像;(b)本文算法增强图像;(c)直方图均衡化增强图像

Fig.12 Testing images of fish 3. (a) Original image; (b) enhanced image of the proposed algorithm; (c) enhanced image of histogram equalization

数,对比直方图均衡化和本文的对比度增强方法,客观的评价图像的处理效果,参数的计算为标准差

$$S = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [f(i,j) - \hat{\mu}]^2}, \quad (5)$$

式中 $\hat{\mu}$ 为图像的灰度均值。

信息熵

$$I[f(i,j)] = - \sum_{n=0}^{MN-1} p_n \log_2(p_n), \quad (6)$$

式中 p_n 表示像素值为 n 的像素出现的概率。

标准差是图像处理数据的精确度的度量,该值越大,表示处理后的数据越离散,即越不精确。熵是信息量的度量,表征图像灰度分布的聚集特性,图像的熵越大,信息量越大,图像内部越均匀,细节越丰富。3种参数的计算结果如表2所示,可以明显地看到,本文算法在增强图像对比度的同时,可以更好地显示样品的细节信息,保证图像的标准差最小,并且有更大的信息熵。而直方图均衡化处理,虽然1号样品和2号样品的对比度比本文算法处理后图像的对比度大,但是这种对比度的增大是以牺牲信息熵为代价的,并且导致图像直方图均衡化处理后的数据过于聚集,标准差更大,这种处理存在较大的偏差。另外,直方图均衡化处理后,X射线图像或者变得亮暗不均匀,如图10(c)和11(c)所示,会丢失样品细节信息,如图12(c)所示。

表2 不同样品的X射线图像对比度增强效果

Table 2 Effect of X-ray image contrast enhancement of different samples

Results	Fish 1			Fish 2			Fish 3		
	Original	Proposed algorithm	Histogram equalization	Original	Proposed algorithm	Histogram equalization	Original	Proposed algorithm	Histogram equalization
C_{RMS}	0.09	0.30	0.55	0.07	0.38	0.55	0.06	0.36	0.35
S	4.69×10^3	49.82	1.84×10^4	594.91	52.79	1.81×10^4	114.79	46.72	1.14×10^4
I	4.46	5.01	2.81	3.08	7.14	2.55	0.96	7.03	0.68

4 结 论

针对对比度低、灰度分布不均匀的同步辐射X射线图像,从人眼视觉特性出发,以同态滤波为核心,结合图像降噪预处理和整体灰度的调整,来达到增强图像对比度的目的。继而分别用分辨率靶和海洋鱼类样品成像,测试研究算法的对比度增强性能,并且与通常用的直方图均衡化对比度增强方法进行对比。研究表明,使用本文算法对对比度低、灰度分布不均匀的同步辐射X射线图像进行对比度增强处理,可以有效降低图像的噪声,减弱同步辐射X射线照度不均匀对图像质量的影响,提高图像的对比度;保证算法处理后的图像有较小的标准差,使图像灰度更均匀;同时增大图像的信息熵,提升样品细节的清晰度,使得观察分析样品信息更加方便准确。

参 考 文 献

- 1 Xu Hongjie. A new generation synchrotron radiation light source and its application [J]. Trends in Nuclear Physics, 1996,13(4): 25-27.
徐洪杰. 新一代同步辐射光源及其应用[J]. 核物理动态, 1996, 13(4): 25-27.
- 2 Ye Linlin, Xue Yanling, Tan Hai, *et al.*. X-ray phase contrast micro-tomography and its application in quantitative 3D imaging study of wild ginseng characteristic microstructures [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(12): 1234002.
叶琳琳, 薛艳玲, 谭海, 等. X射线相衬显微层析及其在野山参特征结构的定量三维成像研究[J]. 光学学报, 2013, 33(12): 1234002.
- 3 P Liu, J Sun, J Zhao, *et al.*. Microvascular imaging using synchrotron radiation [J]. Journal of Synchrotron Radiation, 2010, 17(4): 517-521.
- 4 M Shirai, D O Schwenke, H Tsuchimochi, *et al.*. Synchrotron radiation imaging for advancing our understanding of cardiovascular function [J]. Circ Res. 2013, 112(1): 209-221.
- 5 Peng Guanyun, Wang Yurong, Ren Haiqing, *et al.*. Investigation of characteristic microstructures of adhesive interface in wood/bamboo composite material by synchrotron radiation X-ray phase contrast microscopy [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(3): 829-833.
彭冠云, 王玉荣, 任海青, 等. 基于同步辐射X射线相衬显微CT技术的竹木复合材料胶合界面特征研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(3): 829-833.
- 6 Zhou Hu, Peng Xinhua, Zhang Zhongbin, *et al.*. Characterization of aggregate microstructure of paddy soils cultivated for different years with synchrotron based micro-CT [J]. Transactions of the Chinese society of Agricultural Engineering, 2011, 27(12): 343-347.
周虎, 彭新华, 张中彬, 等. 基于同步辐射微CT研究不同利用年限水稻土团聚体微结构特征[J]. 农业工程学报, 2011, 27(12): 343-347.
- 7 Xiao Tiqiao, Xie Honglan, Deng Biao, *et al.*. Progresses of X-ray imaging methodology and its applications at Shanghai synchrotron radiation facility [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(1):0100001.
肖体乔, 谢红兰, 邓彪, 等. 上海光源X射线成像及其应用研究进展[J]. 光学学报, 2014, 34(1): 0100001.
- 8 H L Edwin. Recent advances in retinex theory and some implications for cortical computations:Color vision and the natural image [C]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1983, 80(16): 5163-5169.
- 9 D J Jobson, Z Rahman, G A Woodell. Properties and performance of a center/surround retinex [J]. IEEE T Image Process, 1997, 6(3): 451-462.

- 10 Z Rahman, D J Jobson, G A Woodell. Image enhancement, image quality, and noise [C]. SPIE, 2005, 5907: 164–178.
- 11 Z Rahman, D J Jobson, G A Woodell. Retinex processing for automatic image enhancement [J]. Journal of Electronic Imaging, 2004, 13(1): 100–110.
- 12 S K Pal, R A King. Image enhancement using smoothing with fuzzy sets [J]. TRANS. SYS, MAN, AND CYBER, 1981, 11(7): 494–500.
- 13 S K Pal, R A King. On edge detection of X-ray images using fuzzy sets [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1983, 5(1): 69–77.
- 14 D Dunn, W E Higgins, J Wakeley. Texture segmentation using 2-D Gabor elementary functions[J]. IEEE Transactions on Pattern analysis and Machine Intelligence, 1994, 16 (2): 130–149.
- 15 D Gabor. Theory of communication. Part 1: The analysis of information [J]. Journal of the Institution of Electrical Engineers, 1946, 93(26): 429–441.
- 16 J G Daugman. Uncertainty relation for resolution in space, spatial frequency, and orientation optimized by two-dimensional visual cortical filters [J]. J Opt Soc Am A, 1985, 2 (7): 1160–1169.
- 17 M R Turner. Texture discrimination by gabor functions [J]. Biological Cybernetics, 1986, 55(2–3): 77–82.
- 18 Li Kai, Zhang Qingchuan. Speckle fringe pattern smoothing method based on gabor filtering [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(10): 2751–2755.
李 凯, 张青川. 基于 Gabor 滤波的散斑条纹图平滑方法[J]. 光学学报, 2009, 29(10): 2751–2755.
- 19 A Jain, N K Ratah, S Lakshmanan. Object detection using gabor filters [J]. Pattern Recognition, 1997, 30(2): 295–309.
- 20 L Hong, Y Wan, A Jain. Fingerprint image enhancement: algorithm and performance evaluation [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998, 20(8): 777–789.
- 21 Y Zhu, T Tan, Y Wang. Biometric personal identification based on iris patterns [C]. Pattern Recognition, International Conference on. IEEE Computer Society, 2000, 2: 2801–2801.
- 22 C Liu, H Wechsler. Gabor feature based classification using the enhanced fisher linear discriminant model for face recognition [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2002, 11(4): 467–476.
- 23 Liu Xing, Hu Guangdao. Hyper spectrum image clouds removal by a new self-adaptive homomorphic filter in frequency domain [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2008, 30(2): 163–168.
刘 星, 胡光道. 高光谱遥感图像频域自适应同态滤波薄云去除[J]. 物探化探计算技术, 2008, 30(2): 163–168.
- 24 Luo Haixia, Liu Bin, Long Yonghong, *et al.*. Application of homomorphic filtering in illumination compensation [J]. Journal of Hunan University of Technology, 2008, 22(5): 23–27.
罗海霞, 刘 斌, 龙永红, 等. 同态滤波在光照补偿中的应用[J]. 湖南工业大学学报, 2008, 22(5): 23–27.
- 25 Hu Douming, Zhao Haisheng, Li Yunchuan, *et al.*. A new approach to infrared image enhancement based on homomorphic filter [J]. Infrared Technology, 2012, 34(4): 224–228.
胡窦明, 赵海生, 李云川, 等. 一种基于同态滤波的红外图像增强新方法[J]. 红外技术, 2012, 34(4): 224–228.
- 26 Fan Youchen, Li Yingchun, Han Yi, *et al.*. Weakening of smoke for homomorphic filtering [J]. Journal of Image and Graphics, 2012, 17(5): 635–640.
范有臣, 李迎春, 韩 意, 等. 提升小波的同态滤波在图像烟雾弱化中应用[J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(5): 635–640.
- 27 E Peli. Contrast in complex images [J]. J Opt Soc Am A, 1990, 7(10): 2032–2040.
- 28 K Tiippana, R Näsänen, J. Rovamo. Contrast matching of two-dimensional compound gratings [J]. Vision Research, 1994, 34(9): 1157–1163.
- 29 P J Bex, W Makous. Spatial frequency, phase, and the contrast of natural images [J]. J Opt Soc Am A, 2002, 19(6): 1096–1106.
- 30 Zhang Xiaolin. X-Ray CCD Measurement of Modulation Transfer Function Research [D]. Shanghai: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Shanghai Institute of Applied Physics), 2010: 50–51.
张晓琳. X 射线 CCD 调制传递函数的高精度测量研究[D]. 上海: 中国科学院研究生院(上海应用物理研究所), 2010: 50–51.
- 31 S Abdulla, M Saleh, H Ibrahim. Mathematical equations for homomorphic filtering in frequency domain: A literature survey [C]. Proc International conference on Information and Knowledge Management, 2012, 45: 74–77.
- 32 R Chen, P Liu, T Xiao, *et al.*. The X-ray imaging for nondestructive microstructure analysis at SSRF [J]. Advanced Materials, 2014, 26(46): 7688–7691.