

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2208823

# 基于改进 MSR 的锂电池 X 射线图像增强算法<sup>\*</sup>

钱玉洋 魏巍 陈灯

(武汉工程大学智能机器人湖北省重点实验室 武汉 430000)

**摘要:** 针对锂电池 X 射线图像存在清晰度低、对比度差、图像电极轮廓模糊不清晰等问题,提出一种基于改进多尺度 Retinex 的锂电池 X 射线图像增强算法。首先,在传统多尺度 Retinex 算法中,使用双边滤波估计照度分量,同时利用基于平均对数亮度值进行全局自适应的图像动态范围压缩。然后使用改进的 MSR 算法提取图像的反射分量,利用 sobel 算子获取反射分量的纵向梯度,再与反射分量进行梯度信息融合,增强图像细节信息,再对融合图像使用 CLAHE 算法进行对比度增强,最后再使用双边滤波去噪声,得到最终增强图像。在自主构建的数据集上进行了实验研究,实验结果表明提出的方法显著提高锂电池 X 射线图像的清晰度和对比度,图像阴极线边缘轮廓有明显增强,在突出锂电池 X 射线图像边缘细节信息和增强图像对比度上,都要明显优于传统多尺度 Retinex 算法。

**关键词:** 锂电池 X 射线图像;多尺度 Retinex;sobel 算子;双边滤波;平均对数亮度值

**中图分类号:** TP391 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.6040

## X-ray image enhancement algorithm of lithium battery based on improved MSR

Qian Yuyang Wei Wei Chen Deng

(Hubei Provincial Key Laboratory of Intelligent Robots, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430000, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of low definition, poor contrast, and blurred electrode contours in lithium battery X-ray images, an X-ray image enhancement algorithm for lithium batteries based on improved multi-scale Retinex was proposed. First, in the traditional multi-scale Retinex algorithm, bilateral filtering is used to estimate the luminance component, while image dynamic range compression is performed globally adaptively based on the mean logarithmic luminance value. Then use the improved MSR algorithm to extract the reflection component of the image, use the sobel operator to obtain the longitudinal gradient of the reflection component, and then fuse the gradient information with the reflection component to enhance the image details, and then use the CLAHE algorithm to enhance the contrast of the fused image, and finally use Bilateral filtering is used to remove noise to obtain the final enhanced image. The experiments are carried out on the self-constructed data set. The experimental results show that the proposed method can significantly improve the clarity and contrast of X-ray images of lithium batteries, and the edge contours of the cathode lines in the images are significantly enhanced. It is significantly better than the traditional multi-scale Retinex algorithm in highlighting the edge details of lithium battery X-ray images and enhancing image contrast.

**Keywords:** lithium battery X-ray image; multi-scale retinex; sobel operator; bilateral filtering; average logarithmic brightness value

## 0 引言

当前,锂电池已经是人们生活中必不可少的一部分,其拥有着工作电压高、能量密度高、可循环次数多、环保性高的等优点,锂电池已被广泛应用于手机、电动车、机动车、5G 基站等各类行业和产品当中。然而,电动车充电自燃严

重威胁人民生命、财产安全的事件时有发生,因此对锂电池出厂前进行缺陷检测<sup>[1]</sup>至关重要。其中,卷绕锂电池<sup>[2]</sup>检测主要技术手段是采用 X 射线对电池内部电极进行穿透成像,应用图像分析技术自动识别电极平齐度。由于锂电池电极间距为毫米级,并且受锂电池包装影响,以及 X 射线穿透能力的限制,采集的锂电池内部图像存在大量噪声、

收稿日期:2022-01-10

<sup>\*</sup> 基金项目:武汉工程大学第十三届研究生教育创新基金(CX2021285)项目资助

不清晰、亮度、对比度低等问题,特别是电极轮廓严重模糊,对锂电池缺陷进行精确检测是一项巨大挑战。

目前,对 X 射线图像的增强算法,主要为 Retinex 理论<sup>[3]</sup>及其改进算法<sup>[4]</sup>。Retinex 算法利用颜色恒常性理论计算图像的本质信息,可以有效改善图像的清晰度,其中多尺度 Retinex(MSR)算法结合了单尺 Retinex 算法的优点,在多个尺度的基础上计算图像的本质信息可获得更好的增强效果,但对低照度图像会出现过度曝光现象,且像边缘处会产生光晕和伪影。崔仲远等<sup>[5]</sup>提出多尺度 Retinex 和双边滤波相融合的图像增强算法,该算法使用双边滤波处理反射分量和 gamma 矫正照射分量,再进行融合,有效的消除 MSR 算法的“光晕伪影”现象且有效保留了图像信息细节,但其对图像细节信息增强不足,容易出现过度曝光的现象。李忠海等<sup>[6]</sup>人提出的基于 Retinex 算法的亮度分层图像增强算法,采用引导滤波在 HSI 色彩空间进行亮度分层,然后对亮度分量使用 MSR 理论得到图像细节层和基本层,最后分别进行增强处理后融合,该方法可有效增强图像且能够消除光照伪影,但其算法设计过于复杂,图像细节与亮度增强仍不足。赵爱玲等<sup>[7]</sup>提出了基于 Retinex 和同态滤波的 X 射线电池图像增强算法,该算法使用多尺度 Retinex 得到反射分量和照射分量,再利用改进的直方图均衡算法和改进的同态滤波分别处理照射分量和反射分量,最终融合产生增强图像,通过综合考虑图像全局信息和局部信息,图像清晰度和对比度得到有效改善,但锂电池图像电极仍不够清晰,无法满足锂电池缺陷精确检测的要求。

针对以上图像细节信息、边缘和对比度增强不足等问题,本文提出一种基于改进多尺度 Retinex 的锂电池 X 射线图像增强算法,通过改进的多尺 Retinex 获取包含图像本质信息的反射分量,再使用 sobel 算子获取反射分量的梯度信息进行梯度融合增强图像细节,然后利用 CLAHE 算法进行图像对比度调节,最后使用双边滤波保边去噪,得到最终增强图像。通过具体实验对该算法进行验证,实验结果表明,本文图像增强算法显著增强锂电池 X 射线图像阴极线边缘轮廓,同时具有高清晰度和对比度,为后续图像电极的缺陷检测奠定良好基础。

## 1 多尺度 Retinex 算法基本理论

根据 Retinex 理论可知,锂电池 X 射线图像  $I(x, y)$  由环境中的照射光分量  $L(x, y)$  乘以基于物体本身性质的反射光分量  $R(x, y)$  来进行描述,其表达式为:

$$I(x, y) = L(x, y) \times R(x, y) \quad (1)$$

由颜色恒常性理论<sup>[8]</sup>可知:对于一幅图像,反射分量决定图像的本质信息,照射分量仅仅是环境的亮度信息的反馈。Retinex 的目的就是从原图像中获取图像的本质信息,避免照射光的影响,进而增强图像。

在实际的 Retinex 计算中,通常对(1)两边取对数,进行对数变换,将乘积关系变为加减关系,如式(2)所示。

$$\log I(x, y) = \log L(x, y) + \log R(x, y) \quad (2)$$

由于只有原图像  $I(x, y)$  是已知,怎样更好的求出  $R(x, y)$  是算法的核心。单尺度 Retinex 算法<sup>[9]</sup>,通过使用高斯滤波与原图像卷积,近似的求出照射分量  $L(x, y)$ ,进而得到  $R(x, y)$ ,其表达式为:

$$\begin{cases} r(x, y) = \log R(x, y) = \log I(x, y) - \log [I(x, y) * G(x, y)] \\ G(x, y) = Ke^{-(x^2 + y^2)/\sigma^2} \end{cases} \quad (3)$$

式中: \* 代表卷积运算;  $G(x, y)$  为高斯滤波函数,用来估计图像的照射分量;  $r(x, y)$  是映射到对数域的反射分量;  $\sigma$  是尺度,  $K$  是归一化常数且设置满足  $\iint G(x, y) dx dy = 1$ 。

由于 SSR 算法增强后的图像对动态范围大幅度压缩<sup>[10]</sup>和细节增强不能相互协调,为了解决 SSR 算法存在的不足,将两者达到很好的平衡,Jobson 等提出了多尺度 Retinex 算法(MSR)<sup>[11]</sup>,其对多个单尺度 Retinex 算法的图像增强结果进行加权,即有:

$$\log R(x, y) = \sum_{n=1}^N \omega_n \{ \log I(x, y) - \log [I(x, y) * G_n(x, y)] \} \quad (4)$$

式中:  $N$  为尺度数目;  $\omega_n$  表示第  $n$  个尺度所对应的权重,一般  $N = 3$  且  $\omega_1 = \omega_2 = \omega_3 = 1/3$ ,取小,中,大 3 个尺度的高斯滤波进行照度估计,结合不同尺度下 SSR 图像优点,达到保持图像细节和动态范围压缩相平衡的目的。但由于在图像边缘处,图像亮度相差较大,光照变化是不平滑的,故一般会产生光晕伪影现象。此外,图像边缘不够突出,对比度低,图像细节信息没有明显改善等也是多尺度 Retinex 算法常见的缺点,因此需要对该算法进行改进。

## 2 本文算法

本文算法框架如图 1 所示。首先,对传统多尺度 Retinex 算法进行改进,使用双边滤波代替高斯滤波进行照度估计,基于平均对数亮度值的自适应全局映射函数代替传统  $\log$  函数进行亮度映射,通过改进的多尺度 Retinex 算法提取图像的反射分量,使 sobel 算子提取反射分量梯度信息,再将其与反射分量融合,增强图像细节。最后,使用 CLAHE 提高融合图像对比度和双边滤波去噪,得到最终增强图像,图像电极对比度和清晰度明显提高,光晕伪影有效减弱,电极轮廓显著增粗。

### 2.1 改进的多尺度 Retinex 算法

1) 基于平均对数亮度值的亮度自适应全局映射

传统对数函数映射是提高图像的低灰度级像素映射范围,并对高灰度级像素值进行压缩,因此会对低照度图像会造成全区域图像过度曝光,图像对比度降低,图像失真。因此,引入基于平均对数亮度值的自适应全局映射<sup>[12]</sup>,其计算如下:

$$f_{AG}(x, y) = \frac{\log(f(x, y)/\bar{f} + 1)}{\log(f_{\max}/\bar{f} + 1)} \quad (5)$$

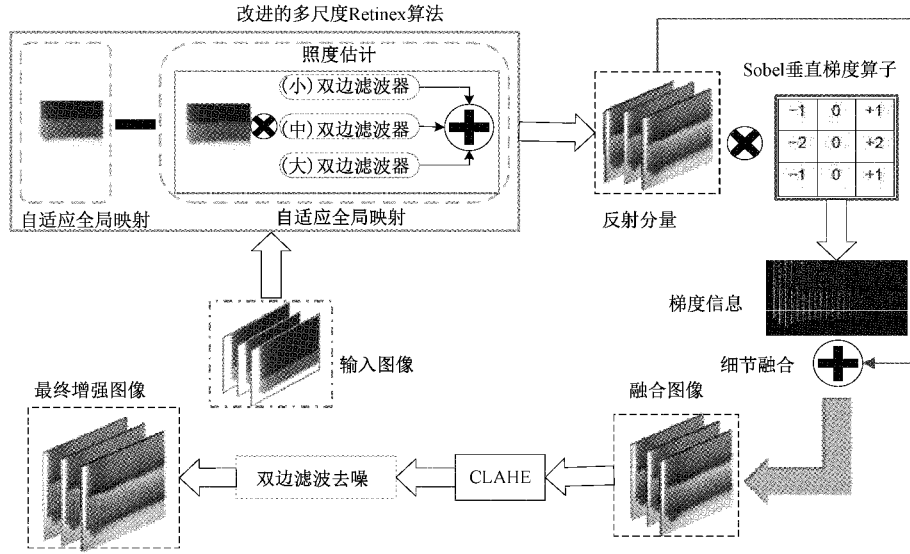


图 1 本文算法框架图

其中,  $f_{AG}(x, y)$  是自适应输出的结果,  $f(x, y)$  表示输入图像,  $f_{\max}$  表示输入图像像素的最大值,  $\bar{f}$  为输入图像的平均对数亮度值, 如下式所示:

$$\bar{f} = \exp\left\{\frac{1}{M} \sum_{x,y} \log(\delta + f(x, y))\right\} \quad (6)$$

式中:  $M$  代表的是像素总数;  $\delta$  的数值往往较小, 主要是避免在 0 灰度值情况下  $\log$  计算时数值出现溢出的现象。

利用式(6), 在图像全局亮度像素区间的映射范围内进行调整, 充分压缩图像整体亮度值, 扩大图像的灰度范围, 对图像低照度区域的亮度调节明显有利, 同时结合使用式(5)可以在考虑图像全局的同时, 自适应的调节恢复一定的低照度区域亮度, 不会出现过度照亮整幅图像的情况。

### 2) 基于双边滤波的照明估计

为减弱多尺度 Retinex 出现的光晕伪影现象, 更准确的计算出反射分量, 本文使用双边滤波器<sup>[13]</sup>代替高斯滤波器进行照明估计, 双边滤波对含噪图像处理后的像素值为:

$$BF(x, y) = \frac{\sum_{(i,j) \in S_{x,y}} w(i, j) I(x, y)}{\sum_{(i,j) \in S_{x,y}} w(i, j)} \quad (7)$$

式中:  $I(x, y)$  是输入的锂电池 X 射线图像,  $S_{x,y}$  是以  $(x, y)$  处像素为中心点的  $d \times d$  大小的领域的像素集合, 其加权系数  $w(i, j)$  由两部分权重因子乘积组成, 对该领域内的每一个像素  $I(i, j)$ , 都有

$$w(i, j) = w_s(i, j)w_r(i, j) \quad (8)$$

其中:

$$w_s(i, j) = \exp\left(-\frac{(i-x)^2 + (j-y)^2}{2\sigma_s^2}\right) \quad (9)$$

$$w_r(i, j) = \exp\left(-\frac{|I(i, j) - I(x, y)|^2}{2\sigma_r^2}\right) \quad (10)$$

$w_s(i, j)$  指的是当前点与中心点的欧式距离, 像素距离越远, 权重越小。  $w_r(i, j)$  指的是当前点灰度与中心点像素的差的绝对值, 当像素差异较大, 权重值则较小。  $\sigma_s$  是基于高斯函数的距离标准差,  $\sigma_r$  是基于高斯函数的灰度标准差, 分别控制两个权重因子的衰减程度。由于  $w_r(i, j)$  函数的作用, 降低图像边缘的高值像素和低值像素在进行照明估计时的相互影响, 进而减弱光晕伪影现象。

### 2.2 基于 sobel 梯度算子的图像锐化

由于改进的多尺度 Retinex 算法, 在增强图像细节边缘上效果不足, 故本文采用 sobel 梯度算子来对反射分量的锐化操作, 提取图像梯度, 再跟反射分量进行融合来增强图像边缘细节。改进的多尺度 Retinex 算法得到的反射分量如图 3(a)所示。Sobel 算子的  $3 \times 3$  的梯度算子<sup>[11]</sup>, 如图 2 所示。

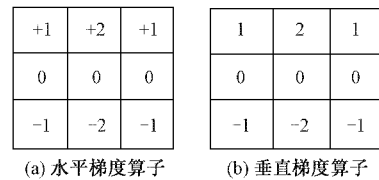


图 2 sobel 梯度算子

根据本文图像电极都是纵向排列, 故仅利用反射分量与垂直梯度算子进行卷积, 计算反射分量的垂直梯度, 如图 3(b)所示, 再将纵向梯度与反射分量融合, 具体计算如式(13), (14):

$$G_y = [F(x-1, y-1) + 2F(x, y-1) + F(x+1, y-1)] - [F(x-1, y+1) + 2F(x, y+1) + F(x+1, y+1)] \quad (11)$$

$$g(x, y) = aF(x, y) + bG_y \quad (12)$$

其中,  $G_y$  分别代表纵向梯度,  $F(x, y)$  表示反射分量

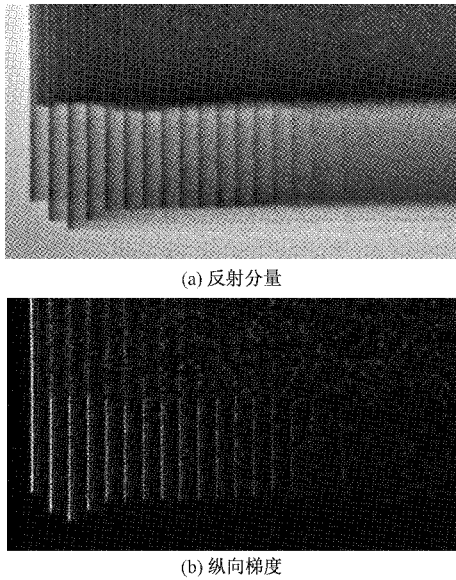


图 3 反射分量及其纵向梯度图

中  $(x, y)$  点处的灰度值,  $a, b$  是分别  $F(x, y)$  和  $G_y$  权重, 取不同的权重, 其融合效果也是不同。

$a, b$  不同参数融合对比度图如图 4 所示, 其中图 4(a) 所示细节增强不足; 图 4(c) 和 (d) 所示, 电极边缘轮廓显著增粗, 但噪音也被放大; 故兼顾增强图像边缘, 同时尽可能的不放大噪声, 本文选择图 4(b)  $a = 1, b = -0.3 \pm 0.1$  这组参数进行图像融合。

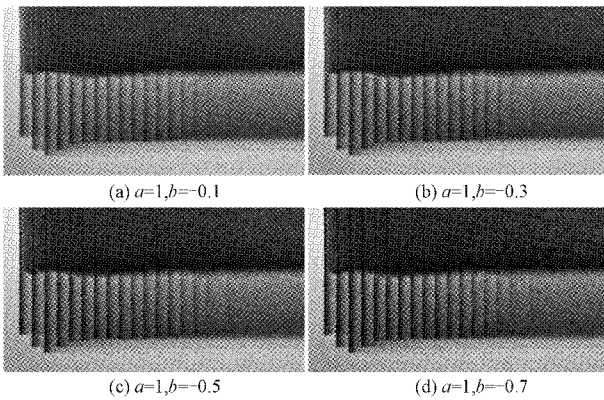


图 4 不同参数梯度图像融合后对比图

### 2.3 基于 CLAHE 对比度调节

经过 sobel 算子垂直梯度融合后的图像, 整体亮度暗淡、对比度仍然偏低, 如图 4(b) 所示, 故本文采用限制对比度自适应直方图均衡化 (CLAHE) 算法进行对比度调整。CLAHE 是通过计算图像多个局部区域直方图, 对局部直方图中高于某个阈值的像素进行裁剪, 再把裁剪的部分均匀分布到直方图中, 以达到限制直方图幅值的目的。

CLAHE 算法实现步骤如下<sup>[15]</sup> :

1) 对锂电池 X 射线图像, 分为大小相同、连续不重叠的子块。

2) 对每个子块直方图进行裁剪。计算裁剪幅值, 即:

$$C = \frac{S}{N}^\alpha \tag{13}$$

其中,  $\alpha$  是截断系数,  $S$  是子块直方图的总像素个数,  $N$  是子块直方图的个数。

3) 分配像素点。将上一步裁剪掉的像素平均分配到每个子块灰度级上。

4) 将对对比度受限后每个子块的灰度直方图进行均衡化处理。

5) 双线性插值进行灰度值重构, 在水平和垂直方向上分别进行双线性插值运算, 重构图像像素值和消除块效应。

不同的截断系数, 对图像的对比度调节有较大的差别, 不同截断系数  $\alpha$  处理后的直方图对比图, 如图 6 所示。

如图 5 和图 6(a) 所示, 是使用 sobel 算子梯度融合后的直方图, 可以观察到图像的大多数像素值主要集中在 100~200 灰度区间内, 在图中大约 180 灰度级处有明显的低谷区。经过 CLAHE 处理后, 在如图 6(b)~(e) 不同的截断参数下, 直方图峰值有明显降低, 灰度级分布的均匀程度, 不同的参数之间直方图差异较小, 故结合图像具体效果, 本文选择  $\alpha = 1.3$  进行 CLAHE 对比度调整。

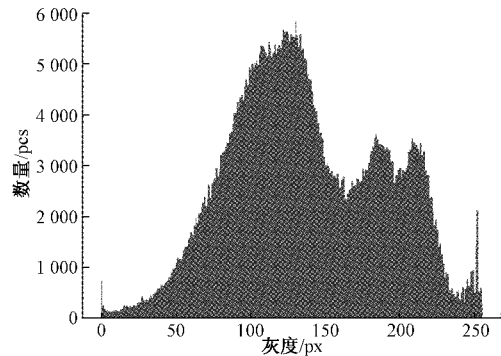


图 5 sobel 算子锐化后图像直方图

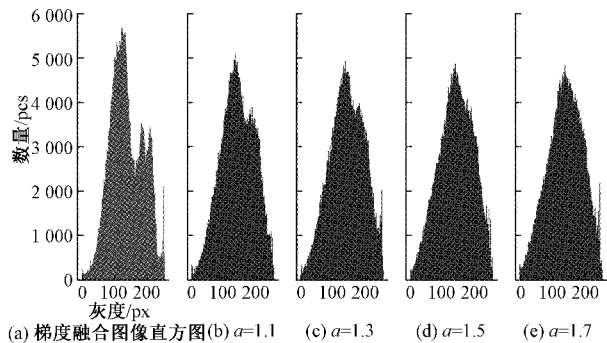


图 6 不同截断系数对应直方图对比

## 3 实验评估

### 3.1 数据集

本文数据集图像是 X 射线发生器发出 X 射线, 穿透电

池内部,由图像探测器接受,再将其转换成可见光后经相机成像,如图 7 所示,将图像的居中电极片区域进行裁剪,得到实验图像,如图 8 所示,突出部分是锂电池的阴极线区域,图 8(a)是有 31 根阴极极线,图 8(b)有 17 根阴极极线。

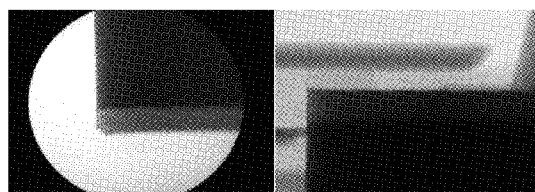
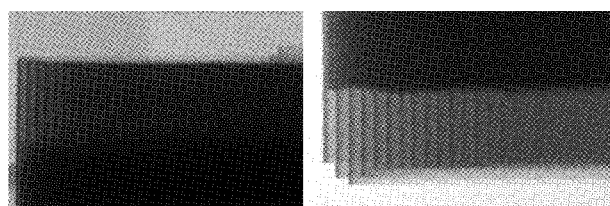


图 7 锂电池 X-ray 原始图像



(a) 31 个阴极线 (b) 17 个阴极线

图 8 锂电池 X-ray 裁剪图像

### 3.2 实验配置

实验在高性能显卡服务器上进行,其软硬件配置:处理器: Intel<sup>®</sup> Core™ i7-8700 CPU @ 3.20 GHz; 内存: 16 GB DDR3; 显卡: GeForce GTX-1080Ti; 软件环境: windows10, OpenCV4.5.1, Python3.7。

### 3.3 实验方法

为验证本文算法对锂电池 X 射线图像增强的有效性,进行两组验证方式进行实验,实验用图如图 8 所示,具体方法内容如下:

1) 本文算法、传统多尺度 Retinex 算法(MSR)、文献[5]所提算法和限制对比度自适应直方图均衡化(CLAHE)算法进行对比实验,并进行主观分析和客观分析。

2) 对本文算法进行消融实验,在改进多尺度 Retinex 算法(IMSIR)的基础上,检验 sobel 算子算法和 CLAHE 算法是否在本文整体算法中发挥其对应的作用,并采集数据进行客观分析,本组实验使用图 8(b)进行实验且不进行单独的去噪处理。

3) Harris 角点检测对比实验,使用图 8(a),利用 Harris 角点检测方法对该原图和其增强图像进行角点检测,根据检测的效果判断本文算法的可行性。

### 3.4 评价指标

图像领域评价方法主要是主观评价和客观评价。主观评价是指人的主观观察,对图像进行主观评价,由人的视觉感知来评价图像是否清晰、是否达到算法实现目标;客观评价方法是使用某种数学模型,反映图像的客观数据,根据数据在进行分析,是否与主观评价一致。

在本文中,使用图像均值、平均梯度、图像信息熵和对比度四种数据指标对图像质量进行客观分析,评估本文提出的锂电池 X-ray 图像增强算法的性能。其中,图像均值反应图像的亮度,均值越大图像的亮度就越大,反之则越小;平均梯度指图像边缘灰度的差异,即灰度变化率的均值,反映图像细节反差变化的速率,表现图像的相对清晰度,平均梯度越大,图像层次越多,也就越清晰;图像信息熵是反映图像中信息量的多少,图像信息熵越大,其包含信息量越丰富,图像对细节的保留越完整;图像对比度指图像中最大灰度值与最小灰度值之间不同亮度的差异的度量,即图像灰度反差的大小,越大呈现出的灰度层次越丰富,边缘细节越明显,反之则图像模糊不清。

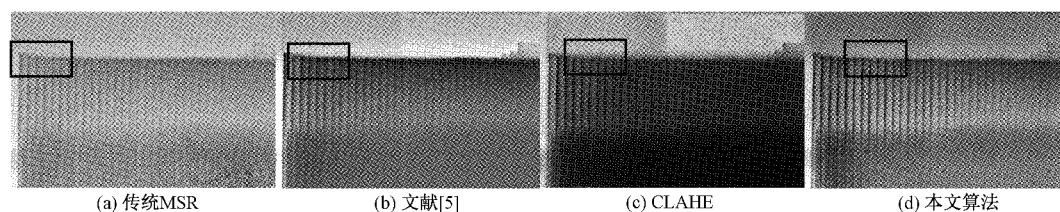
### 3.5 实验效果分析

实验 1) 图像效果图,如图 9、11 所示,由图可知,图 9(a) 出现明显的过度曝光现象,但类似的现象在图 11(a) 却没有出现,同时图像阴极线边缘轮廓没有明显增强,图像整体较为模糊,说明传统 MSR 算法对低照度的图像增强效果较差,特别对大范围有暗区图像还会出现过度曝光现象。

文献[5]所述方法,其图像增强效果较传统 MSR 算法较好,如图 9(b) 所示,但图像整体较为模糊,特别图中阴极线端点处较为模糊,电极轮廓没有增强。图 11(b) 所示,图像整体效果较好,图像阴极线也较为清晰,但同样电极轮廓没有增强,特别是最靠右的电极线仍较为模糊。

CLAHE 算法增强效果较差,如图 9(c) 和图 11(c) 所示,图像整体暗淡模糊不清,对比度较低,阴极线轮廓没有增强,端点区域模糊明显,图像噪声也被明显放大。

本文算法,如图 9(d) 和图 11(d) 所示,图像整体亮度适中,与其他 3 种算法相比,在清晰度和对比度方面具有明显优势,图像边缘细节信息明显增强。通过对图 9 左上角矩形框区域局部效果图放大对比,如图 10 所示,图像阴极线轮廓增强效果显著,表明本文算法在处理边缘特征具有显著效果。



(a) 传统 MSR (b) 文献[5] (c) CLAHE (d) 本文算法

图 9 31 个阴极线图像算法增强效果对比图

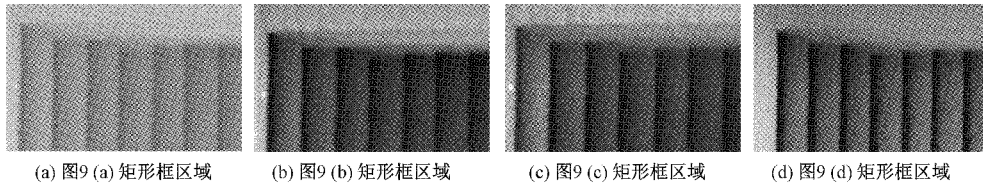


图 10 图 9(a)~(d)左上角矩形框区域局部放大图

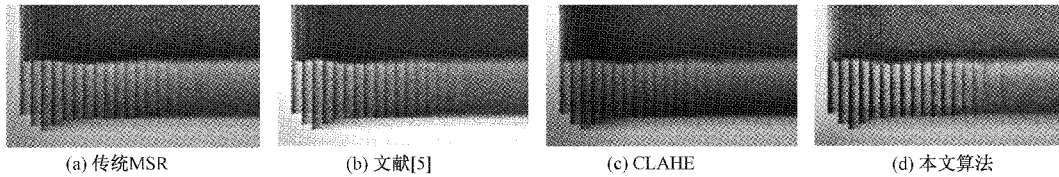


图 11 17 个阴极线图像算法增强效果对比图

3.6 实验定量分析

1) 与其他算法对比实验

如表 1 所示,是上文所述的客观评价指标对图 9、11 两组效果图像进行数据采集,表中数据表明,在图像均值指标方面,本文算法指标处于适中的数值,传统 MSR 算法在

第一组中图像均值明显远大于其他算法,而在对应第二组图像,图像均值却偏小,这表明该算法对大范围暗区图像会产生过度曝光现象,符合其图像效果主观分析。CLAHE 算法均值偏低,图像整体亮度较暗。本文和文献[5]所述算法均值指标数值适中,与其对应图像效果一致。

表 1 图像评价指标对比

实验图像	效果图像	算法	均值	平均梯度	信息熵	对比度
一组以 31 个阴极线 图 8(a)图像	图 9(a)	传统 MSR	176.56	4.35	6.38	65.28
	图 9(b)	文献[5]	145.65	2.32	6.83	21.72
	图 9(c)	CLAHE	90.93	3.64	7.43	30.16
	图 9(d)	本文算法	139.07	6.07	6.90	105.97
二组以 17 个阴极线 图 8(b)图像	图 10(a)	传统 MSR	128.82	4.94	7.46	53.21
	图 10(b)	文献[5]	143.26	4.03	7.09	50.44
	图 10(c)	CLAHE	123.93	4.65	7.45	49.66
	图 10(d)	本文算法	141.77	7.10	7.50	126.35

在图像平均梯度指标上,本文算法指标达到最高,是其他算法 1.6~2.6 倍提升,两组实验其他 3 种算法在平均梯度值都要偏小,主要因为这些算法没有单独对图像边缘细节方面进行增强。

图像信息熵指标,虽然在一组中 CLAHE 算法效果图信息熵指标较高,但其他指标都严重偏低,反而使得图像模糊不清,增强效果差,在其他各算法中,信息熵差别不大,本文算法数值稍高。

图像对比度数值,本文算法在两组图像上都达到最高,相对其他算法的有明显优势,结合对应图像分析可知,没有造成对比度过度增强,而是其他 3 种算法对比度增强不足。

由以上实验结果表明,本文基于改进多尺度 Retinex 的锂电池 x-ray 图像增强算法增强效果要优于其余 3 种算法,可证实本文算法的有效性和可行性。

2) 消融实验

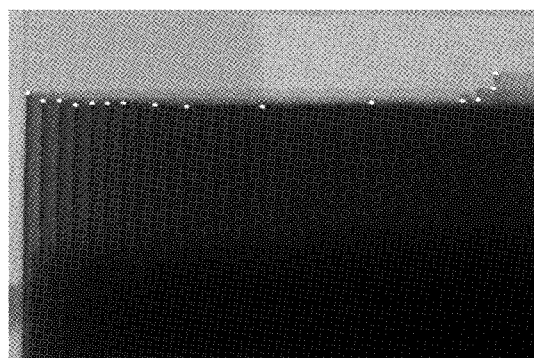
如表 2 所示,是实验 2) 消融实验客观指标对比,实验表明,本文算法相对于改进的多尺度 Retinex(IMSIR),在均值、平均梯度、信息熵和对比度 4 个客观指标均有提升,分别提升了 2.87%、135.67%、2.39% 和 454.16%,与仅有 sobel 算子或 CLAHE 算法,本文算法在平均梯度、信息熵和对比度 3 个指标上也有大幅度提升,表明本文算法各阶段方法的有效性。

3) Harris 角点检测对比结果分析

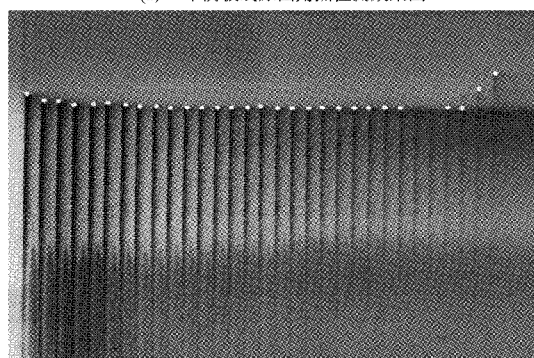
本文使用 Harris 角点检测方法使用图 8(a)与其增强图像进行角点检测,检测效果图像如图 12 所示,本文算法增强图像在使用 Harris 角点检测阴极端点,阴极端点准确检测 28 个,准确率 90.3%,1 个点位置出现偏移,两个端点漏检,故误检率 9.7%。而原图仅有 13 个阴极端点检测准确,准确率 41.9%,故说明本文算法增强后准确率有明显提升,是可行的,可以为后续锂电池 X 射线图像电极缺陷检测奠定良好的数据基础,提高检测的效率和精度。

表 2 本文算法消融实验对比

方法	算法		评价指标			
	sobel	CLAHE	均值	平均梯度	信息熵	对比度
IMSR			137.71	5.86	7.54	71.36
IMSR_S	✓		137.43	8.39	7.62	149.02
IMSR_C		✓	142.68	9.91	7.68	206.42
IMSR_S_C	✓	✓	141.66	13.81	7.72	395.45



(a) 31个阴极线原图角点检测效果图



(b) 31个阴极线增强图角点检测效果图

图 12 Harris 角点检测效果图

## 4 结 论

本文通过分析传统多尺度 Retinex 算法在处理 X-ray 图像存在光晕伪影、细节增强不足和对比度不高等缺点,通过使用双边滤波代替高斯滤波进行光照估计,达到减弱光晕伪影目的,同时使用平均对数亮度值进行自适应的提高极暗区域图像亮度。通过使用 sobel 算子和 CLAHE,增强图像细节信息和调节图像对比度。实验结果表明,本文方法能够实现对光晕伪影的减弱和边缘细节的增强,能够获得对比度较好,图像视觉效果清晰的增强效果。本文算法尤其对整体照度较低的 X 射线图像有较好地增强效果,可有效提升图像边缘细节信息,但仍然存在放大图像噪声的现象,同时本文方法主要注重对锂电池 X 射线图像阴极线部分进行增强,对图像阳极部分的增强有限。在后续工作中,将研究其他的增强图像细节和调节对比度、清晰度的方法,更好地避免在增强图像时放大噪声,兼顾图像阳

极部分增强,这将是接下来的研究方向。

## 参考文献

- [1] 李红亮,潘晋孝,陈平. 基于 X 射线的动力电池质量检测系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2013, 21(2): 300-302.
- [2] 邬灏. 基于 X 光图像分析的锂电池正负极片测量系统[D]. 北京:北京林业大学, 2018, DOI: 10.26949/d.cnki.gblyu.2018.000287.
- [3] 陈越洋,何行宽,李晨瑶. 基于 Retinex 理论的电子内窥镜图像增强算法[J]. 北京理工大学报, 2021, 41(9): 985-989.
- [4] 毛向向,王红军. 薄壁零件复杂光照情况下的轮廓特征识别[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(3): 137-143.
- [5] 崔仲远,张少辉. 多尺度 Retinex 和双边滤波相融合的图像增强算法[J]. 激光杂志, 2015, 36(4): 90-93.
- [6] 李忠海,宋笑宁,陈灿灿,等. 基于 Retinex 算法的亮度分层图像增强算法[J]. 数据采集与处理, 2019, 34(1): 41-49.
- [7] 赵爱玲,张鹏程,刘祎. 基于 Retinex 和同态滤波的 X 射线电池图像增强算法[J]. 测试技术学报, 2021, 35(2): 128-133.
- [8] 孙馨宇. 图像的颜色恒常性计算研究[D]. 北京:北京印刷学院, 2021, DOI: 10.26968/d.cnki.gbjyc.2021.000077.
- [9] 宋冬梅. 图像去雾的单尺度 Retinex 方法综述[J]. 电子元器件与信息技术, 2021, 5(2): 205-206.
- [10] 张晓娟,樊东燕. 红外图像动态范围压缩和对比度增强研究[J]. 激光杂志, 2020, 41(6): 76-79.
- [11] 卫凯龙,张武凤,姜峰,等. 基于 Retinex 算法的暗区图像改进方法[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(9): 13-17.
- [12] 欧阳慧明,李泽民,周永康,等. 红外图像动态范围压缩算法研究综述[J]. 红外技术, 2021, 43(3): 208-217.
- [13] 彭熙舜,陆安江,龙纪安,等. 结合图像分层与暗通道的雾霾图像增强[J]. 电子测量技术, 2022, 45(2): 123-128.
- [14] 黄梦涛,连一鑫. 基于改进 Canny 算子的锂电池极片表面缺陷检测[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(10): 199-209.

[15] 程艳梅,刘志宏. CLAHE 融合边缘细节增强算法的 X 光图像处理[J]. 成都信息工程大学报, 2020, 35(6): 621-624.

**作者简介**

钱玉洋, 硕士, 主要研究方向为计算机视觉与图像处理。  
E-mail: 1938525965@qq.com

魏巍, 教授, 博士, 主要研究方向为机器人及其自动化技术。

E-mail: 18933757@qq.com

陈灯(通信作者), 副教授, 博士, 主要研究方向为工业机器人智能化技术、多媒体数据处理。

E-mail: dchen@wit.edu.cn