



基于同态滤波方法的煤矿井下图像增强技术研究

龚云 颀昕宇

引用本文:

龚云, 颀昕宇. 基于同态滤波方法的煤矿井下图像增强技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(3): 241–250.

GONG Yun, XIE Xinyu. Research on coal mine underground image recognition technology based on homomorphic filtering method[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(3): 241–250.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021-0774>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于深度神经网络的煤矿井下低光照图像增强算法

Deep neural network-based image enhancement algorithm for low-illumination images underground coal mines

煤炭科学技术. 2023, 51(9): 231–241 <https://doi.org/10.12438/cst.2022-1626>

基于阈值和权重Census变换的煤矿井下图像立体匹配算法

A stereo matching algorithm for coal mine underground images based on threshold and weight under Census transform

煤炭科学技术. 2024, 52(6): 216–225 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1169>

基于Transformer和自适应特征融合的矿井低照度图像亮度提升和细节增强方法

An illuminance improvement and details enhancement method on coal mine low-light images based on Transformer and adaptive feature fusion

煤炭科学技术. 2024, 52(1): 297–310 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0112>

基于LMIENet图像增强的矿井下低光环境目标检测方法

LMIENet enhanced object detection method for low light environment in underground mines

煤炭科学技术. 2024, 52(5): 222–235 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0675>

基于改进Otsu的煤体CT图像阈值分割算法的研究

Research on threshold segmentation algorithm of coal CT images based on improved Otsu

煤炭科学技术. 2021, 49(1): 264–271 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.01.023>

基于CFS-YOLO算法的复杂工况环境下煤矸图像识别方法

Image recognition method of coal gangue in complex working conditions based on CES-YOLO algorithm

煤炭科学技术. 2024, 52(6): 226–237 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1967>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

龚云, 颢昕宇. 基于同态滤波方法的煤矿井下图像增强技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(3): 241–250.

GONG Yun, XIE Xinyu. Research on coal mine underground image recognition technology based on homomorphic filtering method[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(3): 241–250.

基于同态滤波方法的煤矿井下图像增强技术研究

龚云, 颢昕宇

(西安科技大学 测绘科学与技术学院, 陕西 西安 710054)

摘 要: 视觉同位定位与地图构建技术在井下搜救工作中运用广泛, 而机器人采集图像质量的好坏直接决定构图的质量, 目前受煤矿井下粉尘和光源的条件影响, 收到的图像信息存在的灰度偏暗和对比度低的问题, 所以井下图像的增强效果有待提高。针对这一问题, 提出一种在 HSV 空间下结合加权分布自适应伽马校正 (Adaptive Gamma Correction with Weighting Distribution, AGCWD) 的同态滤波方法。首先对经典同态滤波算法中存在高亮区和阴影区的过增强问题, 用 AGCWD 算法对 HSV 空间下 V 分量的像素概率密度进行自适应的伽马校正, 非线性地映射出新的概率分布, 提高同态滤波对高光区和阴影区的适用性; 再使用单参数同态滤波进行处理, 以缓解多参数导致的参数过难选择问题; 为了保留图像的细节, 对单参数同态滤波后的结果进行对比度受限的自适应直方图均衡化 (Contrast Limited Histogram Equalization, CLAHE) 处理; 最后进行 HSV 逆变换得到 RGB 空间下的图像, 完成图像的增强。结果表明, 改进的同态滤波算法相较于 CLAHE 算法, 均值、标准差、峰值信噪比 (PSNR) 和信息熵分别提高了 65.29%、21.58%、17.03%、5.18%, 相较于经典同态滤波算法分别提高了 52.07%、40.73%、36.23%、8.96%。试验数据表明改进的同态滤波算法能够在增强图像的亮度和对比度、保留图像细节信息的同时还在一定程度上抑制了经典同态滤波对明暗差距大的像片的过增强现象。

关键词: 图像增强; 伽马校正; 单参数同态滤波算法; CLAHE 算法; 图像处理

中图分类号: TP399

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2023)03-0241-10

Research on coal mine underground image recognition technology based on homomorphic filtering method

GONG Yun, XIE Xinyu

(College of Geomatics, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: Visual SLAM technology is widely used in underground search and rescue work, and the quality of image collected by robot directly determines the quality of image composition. At present, due to the influence of dust and light source conditions in underground coal mine, the enhancement effect of underground image needs to be improved. At present, the coal mine monitoring image enhancement effect needs to be improved due to the influence of dust and light source conditions in the coal mine. In order to solve this problem, this paper puts forward a HSV space combined with Adaptive Gamma Correction with Weighting Distribution (AGCWD) homomorphic filtering method. Firstly, to solve the problem of over-enhancement of the highlight and shadow areas existing in the classical homomorphic filtering algorithm, the AGCWD algorithm is used to carry out adaptive gamma correction for the probability density of the V component in HSV space, and the new probability distribution is non-linearly mapped to improve the applicability of the homomorphic filtering to the high light and shadow areas. Then single-parameter homomorphic filter is used for processing to alleviate the problem of difficult parameter selection caused by multiple parameters. In order to preserve the detail of the image, and then the results of single parameter after the homomorphic filtering to carry on the Contrast Limited Histogram Equalization (CLAHE). Finally, HSV inverse transformation is carried

收稿日期: 2022-04-03

责任编辑: 周子博

DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2021-0774

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51674159)

作者简介: 龚云 (1977—), 男, 陕西西安人, 副教授, 博士。E-mail: hbgongyun@xust.edu.cn

通讯作者: 颢昕宇 (1997—), 男, 陕西宝鸡人, 硕士研究生。E-mail: 435055238@qq.com

out to obtain the image in RGB space, and image enhancement is completed. By the improved homomorphic filtering algorithm, CLAHE algorithm and classical homomorphic filtering algorithm proposed in this experiment, the result image mean, standard deviation, peak signal-to-noise ratio (PSNR), information entropy and other indicators are evaluated. Compared with the CLAHE algorithm, the improved homomorphic filtering algorithm is improved by 65.29%, 21.58%, 17.03% and 5.18% respectively, and compared with the classical homomorphic filtering algorithm, it is improved by 52.07%, 40.73%, 36.23% and 8.96% respectively. The experimental data show that the improved homomorphic filtering algorithm can enhance the brightness and contrast of the image and keep the detail information of the image. At the same time, the overenhancement phenomenon of classical homomorphic filtering on the image with large gap between light and dark is suppressed to a certain extent.

Key words: image enhancement; gamma correction; single-parameter homomorphic filtering algorithm; CLAHE algorithm; image processing

0 引 言

煤炭是我国的主体能源, 约占一次能源的 70%, 但在煤矿生产过程中由于操作不当容易发生瓦斯爆炸、塌方等事故^[1]。当煤矿发生安全事故进行搜救工作时, 同步定位与地图构建技术 (Simultaneous Localization and Mapping, SLAM) 具有更好的应用, 该技术能够在未知环境中, 在没有先验信息情况下, 一边构建塌陷矿道模型, 一边确定被埋人员位置, 为搜救工作争取宝贵时间^[2-3]。由于受到井下粉尘和光源的因素的影响, 视觉 SLAM 系统采集的图像信息呈现着低照度特点和对对比度低的特点, 而图像质量的好坏对后续特征点匹配与建图等任务有着直接影响^[4], 因此对于煤矿井下的图像增强技术的研究具有重要意义。

目前适用于煤矿井下的图像增强技术主要分为基于空间域和基于频率域 2 大方面^[5]。基于空间域图像增强的方法包括了直方图均衡化方法^[6]和 Retinex 方法^[7]等, 基于频率域的方法包括同态滤波方法^[8]。其中直方图均衡化方法只是根据图像的灰度概率分布函数进行简单的全局拉伸, 没有考虑像素间的灰度联系情况, 进行直方图均衡化后, 会在一定程度上提高图像的对比度, 但是图像的灰度级会进行合并进而减少, 造成细节的丢失^[9]。而 Retinex 方法假定空间照度是缓慢变化的, 在图像明暗变化剧烈的区域, 容易出现光晕现象^[10]。因此在处理井下光照差异很明显的图片, 基于频率域的同态滤波方法有更好的效果^[11]。同态滤波是一种结合了频率过滤和灰度变换的方法, 它以图像的照度反射模型作为频域的处理基础, 分别对低频信息进行增强, 高频信息进行抑制, 可以有效解决图像上照度不均匀和动态范围过大对图像产生影响的问题, 在不损失亮区细节信息的同时, 有效增强暗区的细节信息^[12]。国内外很多学者对同态滤波提出了很多改进的方法,

董静薇等^[13]针对视频中的图像增强问题, 从时频分析的角度出发, 将同态滤波中的傅里叶变化用快速小波变换代替, 然后用改进的滤波器对小波系数进行处理, 简化了方法的同时也增强了图像的对比度, 使图像更具有可视性。蔡秀梅等^[14]基于模糊逻辑与模糊集理论将同态滤波中的傅里叶变换与反变换改进为模糊与去模糊隶属度函数变换, 然后在图像的 HSV 空间中, 仅在模糊特征平面上对亮度分量进行改进的同态滤波处理, 在一定程度上增强了图片的对比度。KANWARPREET 等^[15]提出使用分数阶导数与离散傅里叶变换相结合来改进同态滤波, 使得新方法比原始同态滤波方法多了两个自由度, 从而提供了更多设计的灵活性。上述的学者都是把工作的重心放在了对于滤波器中的传递函数改进, 虽然在一定程度上能够增强图像的对比度和提高亮度, 但忽视了同态滤波是一个全局增强方法, 对于煤矿井下明暗差距很大的像片, 往往在增强图像某部分像素的时候, 会使一部分像素过增强, 对高光区和阴影增强方面效果不是很好^[16]。

针对上述同态滤波方法对井下图像增强存在的问题, 提出一种在 HSV 空间下结合加权分布自适应伽马校正 (AGCWD) 的同态滤波方法, 该方法先对 V 分量的亮度像素通过其概率密度进行自适应的伽马校正, 非线性的映射出新的概率分布使得井下图像的概率分布区域更加平滑, 不会出现断崖式的起伏, 进而加强同态滤波对高光区和阴影区的适用性。然后引入一种改进传递函数的单参数同态滤波算法^[17]对 AGCWD 处理后的结果进行同态滤波处理, 由于经典的同态滤波需要用多个参数进行调节, 也非常依赖调节的经验, 而单参数同态滤波可以通过一个参数就能够获得相似的滤波增强效果, 以缓解多参数导致的参数过难选择问题。最后对同态滤波后结果进行对比度受限的自适应直方图均衡化 (CLAHE) 处理^[18], 以提高图像的细节信息。

1 改进同态滤波方法

1.1 加权分布的自适应伽马校正

伽马校正 (Gamma Correction)^[19], 通过参数 γ 的大小来非线性变换调整像片的像素值, 进而改善图像的整体亮度, 可以由式 (1) 表示:

$$T(I) = I_{\max} (I/I_{\max})^\gamma \quad (1)$$

式中: I_{\max} 为输入图像的最大灰度值; I 为输入图像的强度; γ 为伽马校正的伽马系数; $T(I)$ 为输出图像的强度。

当 $\gamma > 1$ 时图像的灰度值增大, 整体亮度提高并增强对比度; 当 $\gamma < 1$ 时图像的灰度值减小, 整体亮度降低但也能在一定程度上提高图像的对对比度; 而当 γ 时图像进行线性变换, 如图 1 所示。

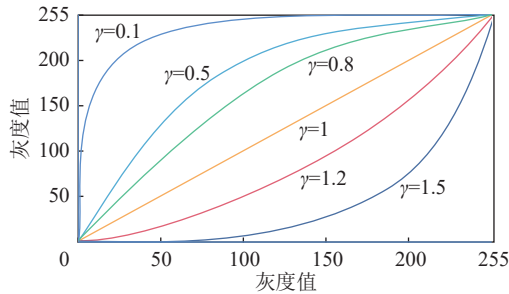


图 1 伽马校正

Fig.1 Gamma correction

由于伽马校正方法只是通过 γ 一个参数进行调节, 缺乏自适应性, 而且对于光暗分布不均匀的图片容易造成过增强的现象。针对以上问题 HUANG 等^[20] 提出一种结合加权分布的自适应伽马校正 (AGCWD), 该方法是用一个补偿的累计分布函数 (cumulative distribution function, cdf) 去代替原始伽马校正的 γ 系数, 可以逐步对低强度进行增强, 以增加其适应性, 自适应伽马校正 (adaptive gamma correction, AGC) 公式如下:

$$T(I) = I_{\max} (I/I_{\max})^{1-\text{cdf}(I)} \quad (2)$$

其中, $\text{cdf}(I)$ 代表 I 亮度的累积分布, 通过计算概率密度函数 (Probability Density Function, pdf), 由下式所示:

$$\text{cdf}_w(I) = \sum_{l=0}^{I_{\max}} \text{pdf}_w(l) / \sum \text{pdf}_w \quad (3)$$

其中, $\sum \text{pdf}_w$ 为整个图像的概率密度之和, 由式 (5) 得出; $\text{pdf}_w(I)$ 为 I 通过加权分布 (Weighting Distribution, WD) 对直方图进行调整之后的概率密度函数, 计算式为:

$$\text{pdf}_w(I) = \text{pdf}_{\max} \left(\frac{\text{pdf}(I) - \text{pdf}_{\min}}{\text{pdf}_{\max} - \text{pdf}_{\min}} \right)^a \quad (4)$$

其中, pdf_{\max} 和 pdf_{\min} 分别为概率密度统计直方图的最大值和最小值。

pdf_w 的求和公式为

$$\sum \text{pdf}_w = \sum_{l=0}^{I_{\max}} \text{pdf}_w(l) \quad (5)$$

由于矿井下的像片一般呈现整体偏暗的特点, 在灰度值较低的区域, 所对应的伽马系数大, 进而产生更显著的效果, 对灰度值高的区域也会通过像片自身特点降低增强效果。图 2 是使用一张井下轨道像片进行 AGCWD 方法处理后的结果。从直方图中可以看出 AGCWD 方法可以对灰度级进行拉伸, 减少暗像元数量, 增加亮像元数量, 也使得灰度级分布更加平滑, 缓解了后续同态滤波因光暗分布不均而造成过增强的现象。

1.2 单参数同态滤波

同态滤波是基于频率域的一种图像增强方法, 它是基于图像的照射—反射模型提出的, 认为图像的照度分量与反射分量以乘性的方式结合^[21], 如下式所示:

$$f(x, y) = i(x, y) \times r(x, y) \quad (6)$$

其中, $f(x, y)$ 为得到的结果图像; $i(x, y)$ 为照射分量, 表示光照部分, 属于变化缓慢的低频分量; $r(x, y)$ 代表反射部分, 属于物体的本身属性, 是变化较快的高频部分。由于在频率域中滤波器对乘性噪声是不可分的, 往往在傅里叶变化前要对图像进行对数变换:

$$\ln f(x, y) = \ln i(x, y) + \ln r(x, y) \quad (7)$$

对式 (3) 两边进行傅里叶变换:

$$F(u, v) = I(u, v) + R(u, v) \quad (8)$$

用传递函数 $H(u, v)$ 对傅里叶变换后的结果进行处理:

$$H(u, v)F(u, v) = H(u, v)I(u, v) + H(u, v)R(u, v) \quad (9)$$

其中, 传递函数 $H(u, v)$ 指同态滤波中的滤波器, 高斯型传递函数:

$$H(u, v) = (r_H - r_L) \left[1 - e^{-c \left(\frac{D(u, v)}{2D_0} \right)^{2n}} \right] + r_L \quad (10)$$

其中, $D(u, v)$ 为频率 (u, v) 到中心频率 (u_0, v_0) 的距离, 由式 (11) 可以得出。 D_0 为截止频率; r_H 为高频增益; r_L 为低频增益; c 为锐化系数, n 为滤波器的阶数。

$$D(u, v) = \sqrt{(u - u_0)^2 + (v - v_0)^2} \quad (11)$$

由式 (10) 可知, 常用同态滤波的传递函数有 r_H 、 r_L 、 c 、 n 四个参数共同调节, 在不同情况下针对 r_H 、 r_L

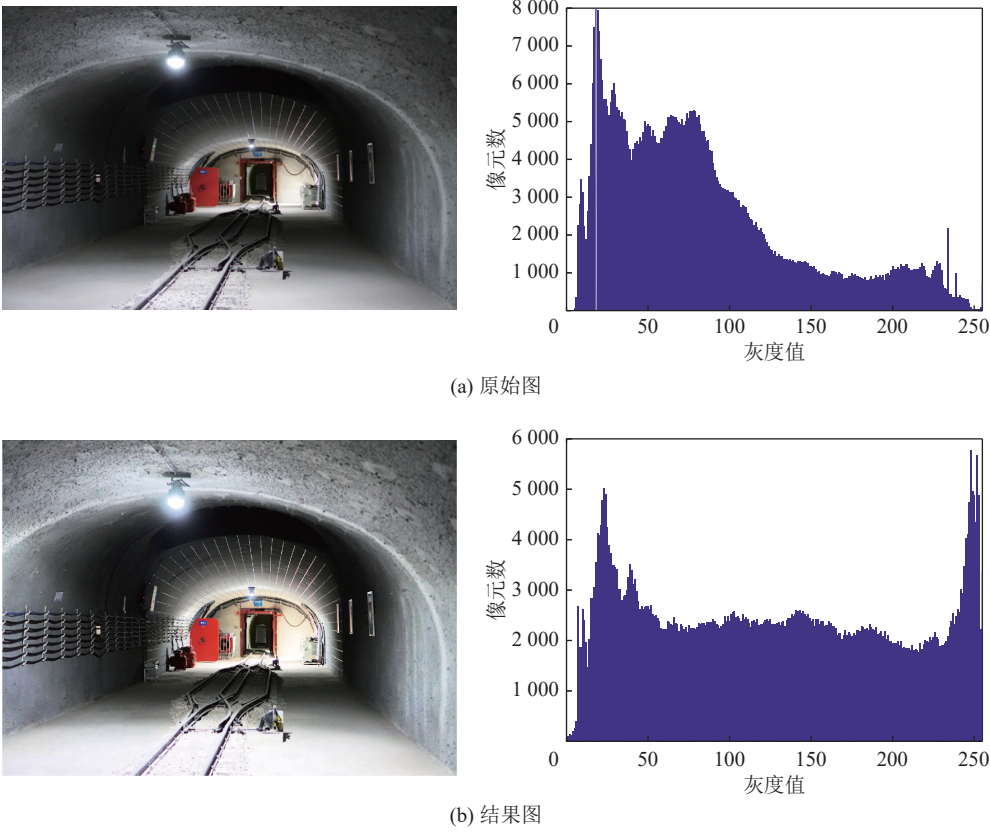


图 2 AGCWD 前后的图像与灰度直方图
Fig.2 Image and gray histogram before and after AGCWD

和 n 三个参数的选择很依赖调节经验,所以引入一种单参数同态滤波方法,该方法是王智奇等^[17]根据 S 型函数的剖面与同态滤波的剖面有相似的结构这一原理,构建出新的传递函数为

$$H(u,v) = \frac{1}{1 + e^{\left[-k \frac{D_0}{D(u,v)}\right]}} \quad (12)$$

式 (12) 构建出新的传递函数中只存在着一个参数 k ,其中 $D(u,v)$ 的意义以及计算方法与常用的同态滤波器相同。单参数的传递函数三维结构如图 3a

所示。高斯型同态滤波器是基于高斯高通型滤波器,其三维结构如图 3b 所示,对比图 3a 和图 3b 单参数的同态滤波方法对低频分量有 0.5 左右的增益,而高斯型同态滤波器在不增强低频分量的前提下,低频增量为 0,因此在压缩图像的动态范围时易出现过压缩现象。单参数同态滤波器由中心频率到高频的过渡相较传统的同态滤波器更平缓,斜率更小,进而滤波更加均匀。

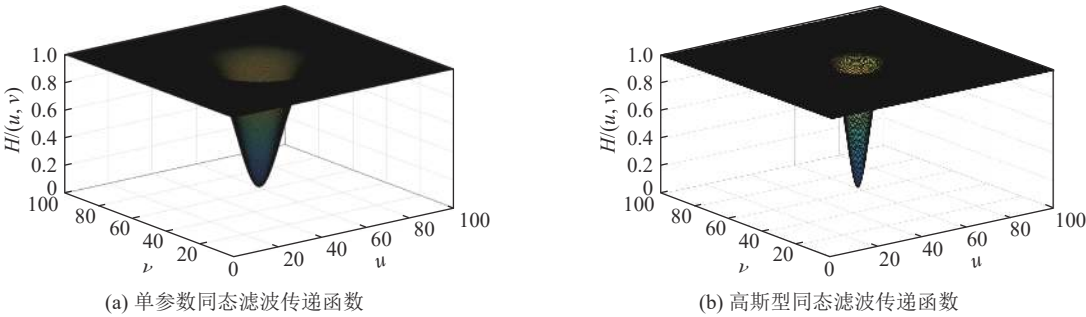


图 3 传递函数的三维图
Fig.3 Three-dimensional diagram of the transfer function

1.3 对比度受限的自适应直方图均衡化
经同态滤波后的图像能有效改善光照不均匀所

引起的光暗不一,但整体对比度还不够,为进一步提高对比度和增加图像的细节信息,引入一种 CLAHE

的方法。经典的直方图均衡化是一种全局方法,不能充分考虑图像的内容。对于煤矿井下的图像,可能只需对某个部分进行均衡化,而经典的直方图均衡化方法就会使图像错误增强,因此 HUANG 等^[22]提出 CLAHE 方法,该方法是一种局部方法,通过抑制直方图均衡化过程中由于部分灰度级被过多合并、部分灰度级丢失所引起的噪声过度增强,提高图像对比度的同时使图像轮廓更清晰。具体做法是将图像分为若干个块区域,以块为单位计算直方图,在计算累积分布函数前,以预先定义的阈值对每个子块直方图裁剪来限制放大幅度,将超出阈值的部分重新均匀分布到其他部分,如图 4 所示。

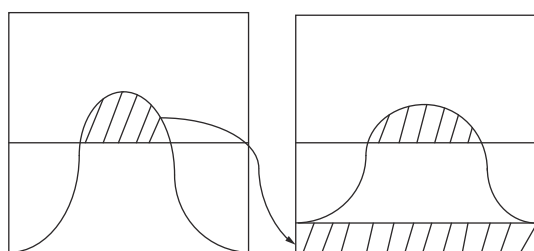


图 4 CLAHE 原理示意
Fig.4 Schematic of CLAHE principle

2 方法流程设计

同态滤波是一种全局型的图像增强方法,对于明暗差距较大的煤矿井下像片,往往在增强图像暗像素时,使得亮像素过增强,缺乏适应性。针对这一问题,首先使用 AGCWD 方法对待增强图像的灰度根据其概率分布进行自适应伽马校正,使得图像灰度的概率分布更加平滑,进而可以减少同态滤波过程中对高亮区和阴影区过增加的影响。然后使用单参数同态滤波方法处理,增加图像的亮度与对比度。最后使用 CLAHE 方法,提高同态滤波后图像的细节信息。方法流程如图 5 所示,具体流程如下:

1) 由于图片在 RGB 空间中变换容易造成失真现象,而提高图片的亮度与对比度在 HSV 空间下效果会更好,所以本方法先将图片由 RGB 空间转换到 HSV 空间,提取出 H、S 和 V 三个分量;

2) 保持色调 H 和 S 分量不变,利用 AGCWD 方法对 V 分量进行校正。先通过 V 分量的灰度级和每个灰度级的灰度分布来计算出各灰度级的概率密度函数,构成概率密度函数直方图,找出概率密度统计直方图中的最大值和最小值,通过式 (4) 使用加权分布对直方图进行调整,然后使用式 (3) 计算出灰度值的累计分布,最后通过式 (2) 进行伽马校正。

3) 将 AGCWD 的结果进行单参数同态滤波处理。首先对图像取对数,使图像的照度分量与反射分量变成相加可分关系,再进行傅里叶变换得到图像在空间域的分布情况;使用式 (12) 传递函数对空间域的图像进行滤波处理,然后进行傅里叶逆变换和指数处理得到同态滤波后的图像。

4) 将单参数同态滤波的结果进行 CLAHE 处理;CLAHE 方法在 MATLAB 中有集成好的函数,函数名为 `adapthisteq`。把同态滤波后的结果导入到 MATLAB 中,直接调用 `adapthisteq` 函数即可得到结果。

5) 最后用原始图像的 H、S 分量和处理后的 V 分量波段合成后,进行 HSV 逆变换得到 RGB 空间下的图像。

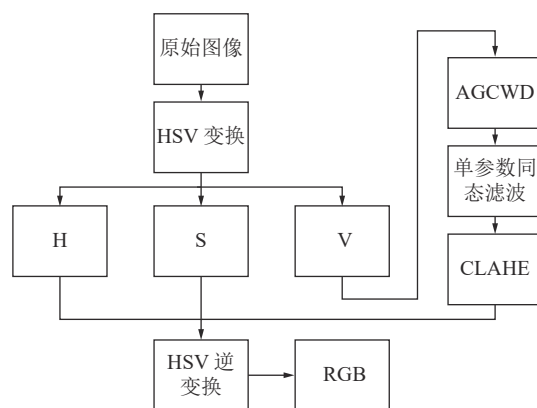


图 5 本算法的流程
Fig.5 The flow of the algorithm

3 试验分析

为了对研究提出的方法进行有效性验证,在西安科技大学采矿实验室中拍摄 3 张像片分别代表轨道、巷道、采矿面作为待处理图像。试验硬件平台采用 Inter(R) Core(TM) i5-6300HQ CPU,主频 2.3 GHz,内存 16G;软件平台基于 MATLAB R2014a, Windows 10 操作系统。分别采用经典的同态滤波,对比度受限的自适应直方图均衡化,和本研究改进的同态滤波 3 种方法对 3 种图像进行增强,然后从主观上的增强结果图及其灰度直方图,和客观上的标准差、均值、峰值信号比 (PSNR)、信息熵 4 个评价标准两方面进行分析。

3.1 轨道图像分析

试验选取的轨道图像具有对比度低的特点,并且在照明灯下方的轨道由于强光照的影响,其轨枕和道碴等细节信息不明显。根据试验结果可以看出 3 种方法都对图像有着明显的增强作用,可是 CLAHE 方法的灰度级集中在 0~100(图 7b),虽然在提高图

像对比度的同时能保留丰富的细节信息,但亮度的提升效果不如其他 2 种方法。经典的同态滤波方法对于高光照区域(图 6b)有明显的过增强效果,增强后的结果丢失了轨枕和道碴等细节信息。而本研究改进的同态滤波方法进行增强后的图像的灰度级在每个区间都分布均匀(图 7d),并且对同态滤波中的过增强方面有一定的改善,还保留了原图像的细节信息。

使用常用的均值、标准差、PSNR 以及信息熵 4 个评价指标对 3 种方法进行客观评价,结果见表 1。其中标准差是用来评价图像的对比度,如果标准差越大,代表图像的对比度越大;图像的均值代表明亮程度,数值越大图像亮度越高;峰值信噪比是一种用来评价图像保真性的客观标准,一幅图像信噪比越大代表图像失真越小;信息熵是一种反映图像上所具有信息量的评价指标,若信息熵越大则表示图像所具有的信息越丰富^[23]。由表 1 可以得出,本研究改进的同态滤波方法相比于其他 2 种方法的标准差、

均值、PSNR 和信息熵 4 个评价标准均有所提高,其中相比于经典的同态滤波方法在轨道像片中均值、标准差、峰值信噪比和信息熵分别提高了 13.04%、18.67%、25.97%、2.31%;相比于 CLAHE 方法均值、标准差、峰值信噪比和信息熵分别提高了 32.70%、9.23%、16.23%、0.98%。

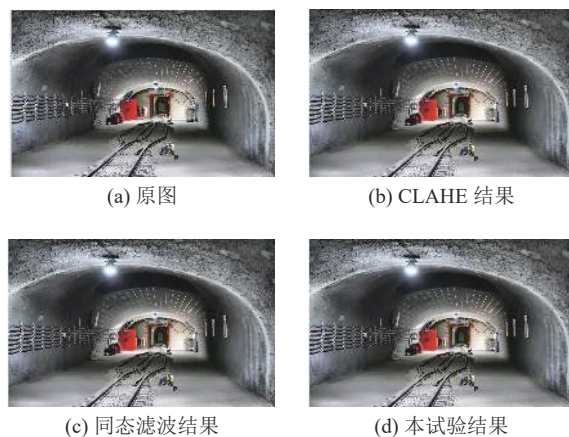


图 6 轨道图像的试验结果

Fig.6 Experimental results of orbital images

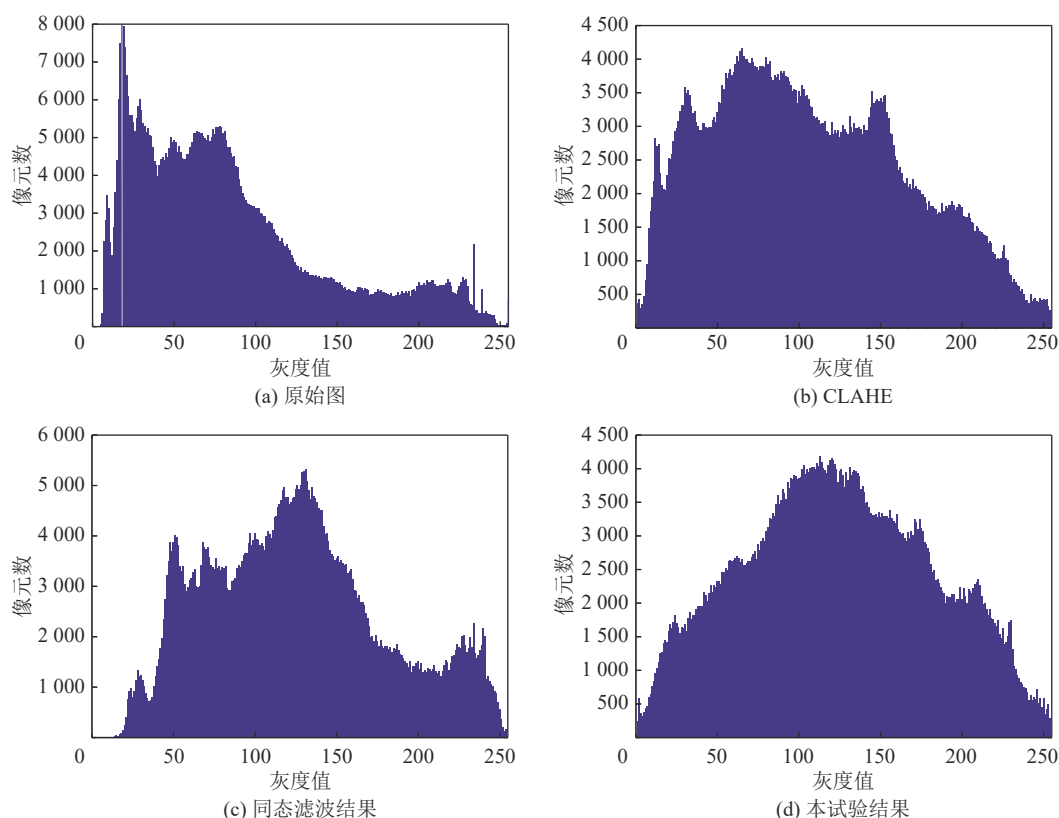


图 7 轨道图像的试验结果的灰度直方图

Fig.7 Gray histogram of the experimental results of the track image

3.2 巷道图像分析

试验选取巷道图像的灰度均值是 3 张图片中最

低的,能充分说明 3 种增强方法对亮度的提高效果(图 8)。由图 9d 可知,图像经过本研究改进方法处

理后的灰度主要分布在 50 ~ 200, 使得图像亮度增加显示更加清楚, 并且每个灰度级分布更加均匀, 提高了图像的对比度, 对于图 8c 中同态滤波处理后的结果所造成的过增强区域有所改善。

表 1 轨道图像性能指标
Table 1 Track image performance index

算法类别	均值	标准差	PSNR	信息熵
原图	82.474 2	52.162 1	—	7.572 0
同态滤波算法	124.533 1	54.917 1	16.662 0	7.717 2
CLAHE算法	106.081 7	59.663 3	18.059 0	7.818 8
本研究算法	140.768 2	65.169 1	20.989 4	7.895 6



图 8 巷道图像的试验结果
Fig.8 Experimental results of roadway images

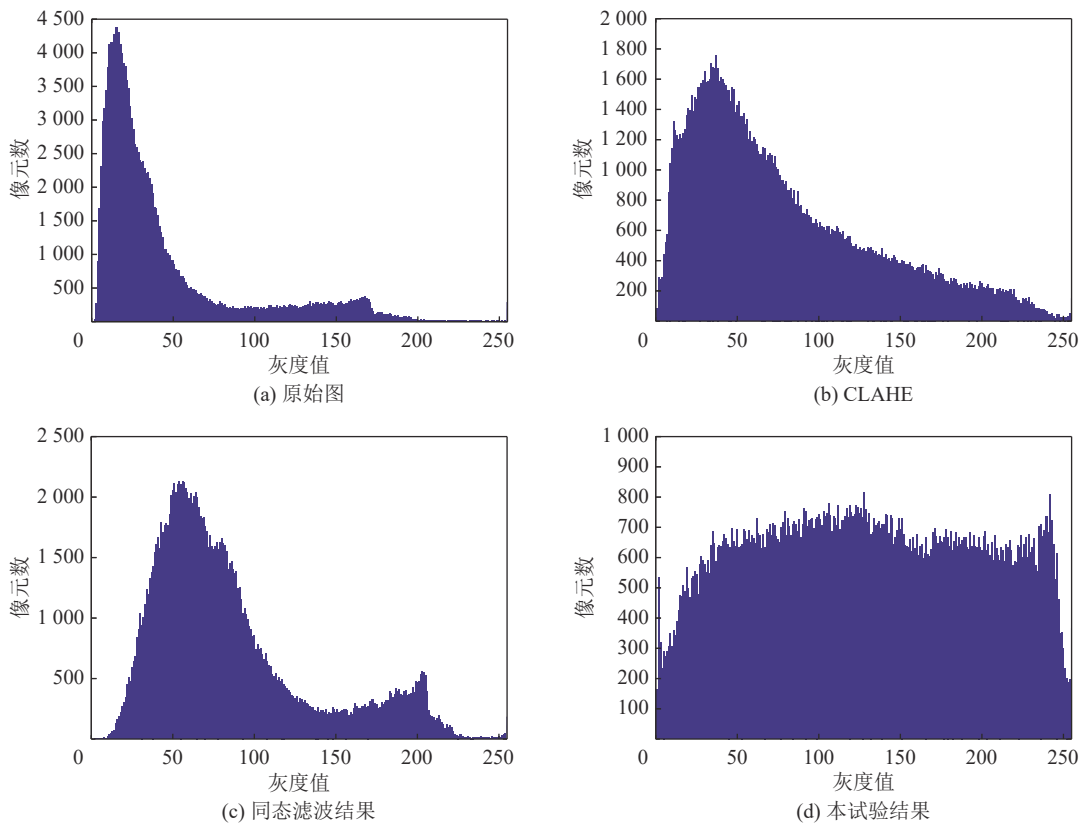


图 9 巷道图像结果的灰度直方图
Fig.9 Gray histogram of experimental results of roadway image

由表 2 可知对于巷道图像, 本研究改进的同态滤波方法相比于经典的同态滤波方法在均值、标准差、峰值信噪比和信息熵分别提高了 52.07%、40.73%、36.23%、8.96%。相比于 CLAHE 方法均值、标准差、峰值信噪比和信息熵分别提高了 65.29%、21.58%、17.03%、5.18%。

3.3 采矿面图像分析

煤矿的反射率较低^[24], 在井下图像中由于光照

表 2 巷道图像性能指标
Table 2 Roadway image performance index

算法类别	均值	标准差	PSNR	信息熵
原图	43.172 0	45.251 2	—	6.642 0
同态滤波算法	84.513 9	48.814 0	14.468 6	7.313 2
CLAHE算法	77.759 5	56.504 4	16.841 8	7.575 8
本研究算法	128.527 3	68.697 6	19.710 3	7.968 5

分布不均往往呈现出黑色区域,如图10a所示。因为CLAHE方法根本原理是对灰度级的拉伸,同态滤波只是单纯增强暗区和保留亮区信息,所以这2种方法在处理大片黑色区域时效果不是很明显。而本研究方法首先利用每个灰度级的概率密度,对每个灰度级进行伽马校正,增强每个灰度级的同时也使灰度相差很小的灰度级分离更加明显,再进行同态滤波增强图像暗区,结果如图10d所示,对整个采矿面增强比其他2种方法明显。

由表3和图11可知对于巷道图像,本研究改进的同态滤波方法相比于经典的同态滤波方法在均值、标准差、峰值信噪比和信息熵分别提高了18.75%、17.66%、11.20%、2.90%。相比于CLAHE方法均值、标准差、峰值信噪比和信息熵分别提高了36.35%、

2.60%、6.88%、2.89%。

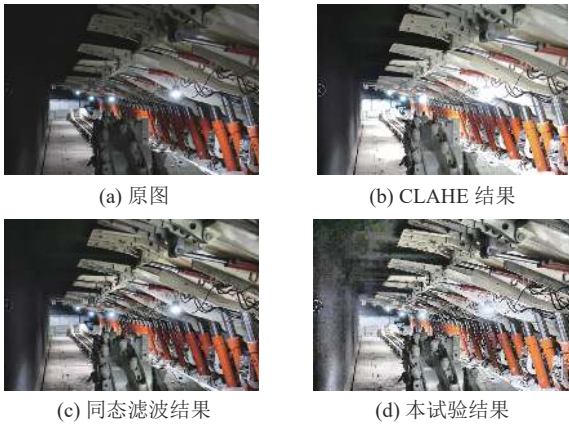


图10 采矿工作面图像的试验结果
Fig.10 Experimental results of mining face image

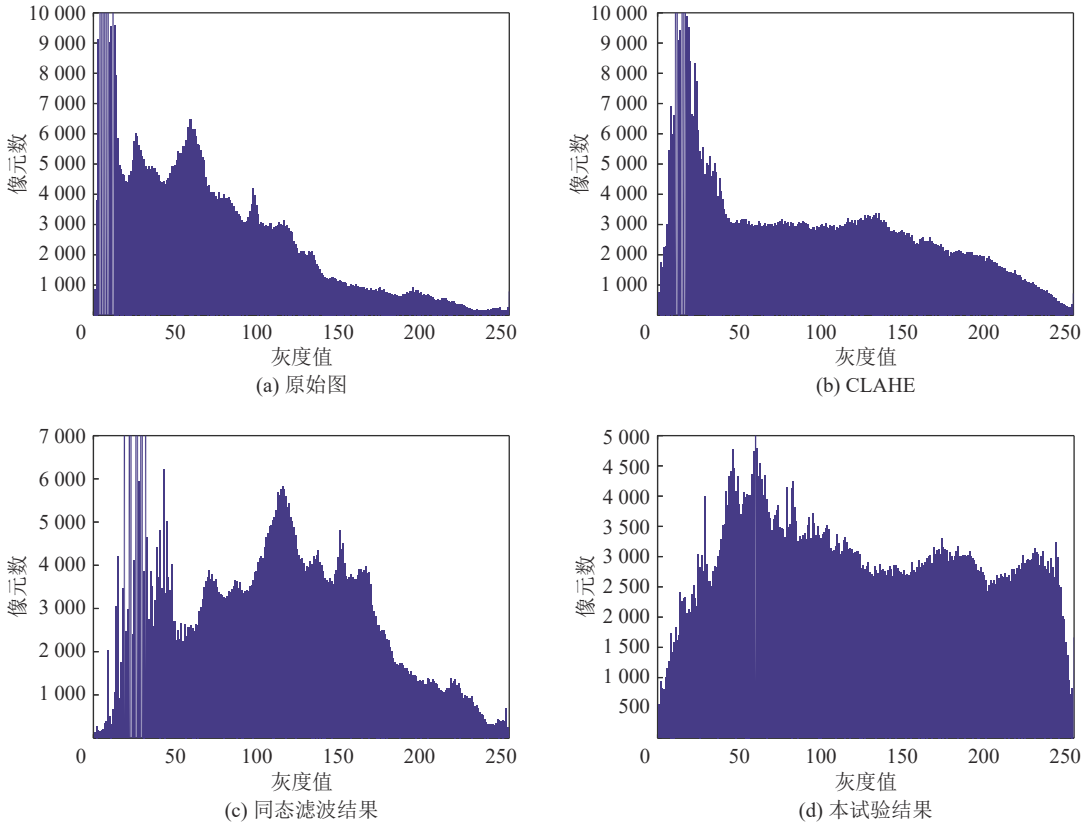


图11 采矿工作面图像结果的灰度直方图
Fig.11 Gray histogram of experimental results of mining face image

表3 采矿工作面图像性能指标

Table 3 Mining face image performance index

算法类别	均值	标准差	PSNR	信息熵
原图	63.425 7	54.662 7	—	7.302 4
同态滤波算法	104.426 5	58.846 1	16.724 5	7.730 5
CLAHE算法	90.945 4	67.478 5	17.400 5	7.731 4
本研究算法	124.004 5	69.239 3	18.598 1	7.954 8

4 结 论

1)同态滤波方法是一种全局增强方法,对于煤矿井下明暗差距很大的影像,往往在增强图像某部分像素的时候,会使一部分像素过增强,所以使用AGCWD方法将井下影像的像素通过其概率密度非线性的映射出新的概率分布使得灰度级分布更加平滑,不会出现断崖式的起伏,进而加强同态滤波方法

对高光区和阴影区的适用性。根据 S 型函数的剖面与同态滤波的剖面有相似的结构这一原理, 构建出新的传递函数将同态滤波中的 4 个调节参数转化为一个调节参数, 减少了方法参数选择困难的同时对低频分量有一定的增益, 能够改善经典的同态滤波器在压缩图像的动态范围时出现的过压缩现象。

2) 通过文中影像增强方法和经典的影像增强方法建立对照试验, 结果表明, 改进的同态滤波方法相较于 CLAHE 方法, 均值、标准差、峰值信噪比 (PSNR) 和信息熵分别提高了 65.29%、21.58%、17.03%、5.18%, 相较于经典同态滤波方法分别提高了 52.07%、40.73%、36.23%、8.96%。试验数据表明改进的同态滤波方法能够在增强图像的亮度和对比度, 保留了图像的细节信息的同时还在一定程度下抑制了经典同态滤波对明暗差距大的像片的过增强现象。

3) 该研究只是对井下影像数据进行增强, 后续任务可以对井下监控视频进行增强, 但井下视频由于其帧数和时长, 可能会导致该方法在时间效率上有一定的缺陷, 即如何满足增强效果的同时提高时间效率将是今后研究的关键性问题。

参考文献(References):

- [1] 王国法, 庞义辉, 任怀伟. 煤炭安全高效综采理论、技术与装备的创新和实践[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(4): 903-913.
WANG Guofa, PANG Yihui, REN Huaiwei. Innovation and practice of safe and efficient fully mechanized coal mining theory, technology and equipment[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(4): 903-913.
- [2] 苗 升, 刘小雄, 黄剑雄, 等. 无人机视觉SLAM环境感知发展研究[J]. *计算机测量与控制*, 2021, 29(8): 1-6, 41.
MIAO Sheng, LIU Xiaoxiong, HUANG Jianxiong, *et al.* Research on the development of U-AV visual slam environment perception[J]. *Computer Measurement & Control*, 2021, 29(8): 1-6, 41.
- [3] 杨梦佳. 基于惯导与双目视觉融合的SLAM技术研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2020.
YANG Mengjia. SLAM Technology Based on Inertial Navigation and Binocular Vision Fusion[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2020.
- [4] SOARES João Carlos Virgolino and Gattass Marcelo and Meggiolaro Marco Antonio. Crowd-SLAM: Visual SLAM Towards Crowded Environments using Object Detection[J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2021, 102(2).
- [5] 王 浩, 张 叶, 沈宏海, 等. 图像增强算法综述[J]. *中国光学*, 2017, 10(4): 438-448.
WANG Hao, ZHANG Ye, SHEN Honghai, *et al.* Overview of image enhancement algorithms[J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(4): 438-448.
- [6] 毕秀丽, 邱雨檬, 肖 斌, 等. 基于统计特征的图像直方图均衡化检测方法[J]. *计算机学报*, 2021, 44(2): 292-303.
BI Xiuli, QIU Yumeng, XIAO Bin, *et al.* Image histogram equalization detection method based on statistical features[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2021, 44(2): 292-303.
- [7] WANG Fengjuan, ZHANG Baoju, ZHANG Cuiping, *et al.* Low-light image joint enhancement optimization algorithm based on frame accumulation and multi-scale Retinex[J]. *Ad Hoc Networks*, 2020, 113(4): 102398.
- [8] DONG Shuai, MA Jia, SU Zhilong, *et al.* Robust circular marker localization under non-uniform illuminations based on homomorphic filtering[J]. *Measurement*, 2021, 170(5): 108700.
- [9] 汪秦峰. 基于直方图均衡化和Retinex的图像去雾算法研究[D]. 西安: 西北大学, 2016.
WANG Qinfeng. Research on image dehazing algorithm based on histogram equalization and Retinex[D]. Xi'an: Northwest University, 2016.
- [10] 刘 健, 郭 潇, 徐鑫龙, 等. 基于Retinex理论的低照度图像增强技术[J]. *火力与指挥控制*, 2019, 44(9): 139-143.
LIU Jian, GUO Xiao, XU Xinlong, *et al.* Low illumination image enhancement technology based on Retinex theory[J]. *Fire Control & Command Control*, 2019, 44(9): 139-143.
- [11] 程 健, 鹏 鹏, 郁华森, 等. 基于有向线段误匹配剔除的煤矿巷道复杂场景图像拼接方法[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(9): 179-191.
CHENG Jian, YAN Pengpeng, YU Huasen, *et al.* Image stitching method for the complicated scene of coalmine tunnel based on mismatched elimination with directed line segments[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(9): 179-191.
- [12] ZENG Fei, WU Qing, DU Jun. Foggy image enhancement based on filter variable multi-scale retinex[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 2973: 1041-1045.
- [13] 董静薇, 赵春丽, 海 博. 融合同态滤波和小波变换的图像去雾算法研究[J]. *哈尔滨理工大学学报*, 2019, 24(1): 66-70.
DONG Jinwei, ZHAO Chunli, HAI Bo. Image demogging algorithm for fusion homomorphism filtering and wavelet transform[J]. *Journal of Harbin University of Science and Technology*, 2019, 24(1): 66-70.
- [14] 蔡秀梅, 马今璐, 吴成茂, 等. 基于模糊同态滤波的彩色图像增强算法[J]. *计算机仿真*, 2020, 37(6): 342-346.
CAI Xiumei, MA Jinlu, WU Chengmao, *et al.* Color image enhancement algorithm based on Fuzzy homomorphic filtering[J]. *Computer Simulation*, 2020, 37(6): 342-346.
- [15] KANWARPREET Kaur, NEERU Jindal, KULBIR Singh. Improved homomorphic filtering using fractional derivatives for enhancement of low contrast and non-uniformly illuminated images[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2019, 78(19): 27891-27914.
- [16] 梁 琳, 何卫平, 雷 蕾, 等. 光照不均图像增强方法综述[J]. *计算机应用研究*, 2010, 27(5): 1625-1628.
LIANG Lin, HE Weipin, LEI Lei, *et al.* Overview of image enhancement methods under uneven illumination[J]. *Application Research of Computers*, 2010, 27(5): 1625-1628.
- [17] 王智奇, 李荣冰, 刘建业, 等. 基于同态滤波和直方图均衡化的

- 图像增强算法[J]. *电子测量技术*, 2020, 43(24): 75–80.
- WANG Zhiqi, LI Rongbing, LIU Jianye, *et al.* Image enhancement algorithm based on homomorphic filtering and histogram equalization[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2020, 43(24): 75–80.
- [18] HANA F M, MAULIDA I D. Analysis of contrast limited adaptive histogram equalization (CLAHE) parameters on finger knuckle print identification[J]. *Journal of Physics:Conference Series*, 2021, 1764(1): 012–024.
- [19] 鲁转丽. 高分辨率光学遥感影像对比度增强方法研究[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2018.
- NU Zhuanli. Contrast enhancement of high resolution optical remote sensing image[D] Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision, 2018.
- [20] HUANG Shihchia, CHENG Fanchieh, CHIU Yisheng. Efficient contrast enhancement using adaptive gamma correction with weighting distribution.[J]. *IEEE transactions on image processing: a publication of the IEEE Signal Processing Society*, 2013, 22(3): 1032–1041.
- [21] 李连志, 邢川. 基于同态滤波的平面视觉图像色彩增强算法[J]. *计算机仿真*, 2021, 38(2): 249–252, 426
- LI Lianzhi, XING Chuan. Color enhancement algorithm of p-lane vision image based on homomorphic filtering[J] *Computer Simulation*, 2021, 38(2): 249–252, 426
- [22] HUANG Lidong, ZHAO Wei, WANG Jun, *et al.* Combination of contrast limited adaptive histogram equalisation and discrete wavelet transform for image enhancement[J]. *IET Image Processing*, 2015, 9(10): 908–915.
- [23] 韩少刚. 基于多直方图均衡的图像增强算法研究[D]. 安庆: 安庆师范大学, 2020.
- HAN Shaogang. Image enhancement algorithm based on multi-histogram equalization[D] Anqing : Anqing Normal University, 2020.
- [24] 杨恩. 煤岩反射光谱特征及识别方法研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- YANG En. Study on reflectance spectrum characteristics and recognition method of coal and rock[D]. Xuzhou: China University of mining and Technology, 2019.