

控制与决策

Control and Decision

变压器油下图像增强算法

冯迎宾, 刘文竹, 于伟经, 寇亚辉, 刘砚菊

引用本文:

冯迎宾, 刘文竹, 于伟经, 寇亚辉, 刘砚菊. 变压器油下图像增强算法[J]. *控制与决策*, 2023, 38(4): 1101–1108.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.1595>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于改进SSA优化MDS-SVM的变压器故障诊断方法](#)

Transformer fault diagnosis method based on improved SSA optimized MDS-SVM

控制与决策. 2023, 38(2): 459–467 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.1437>

[基于复原结构与增强纹理融合的水下图像清晰化](#)

Underwater image sharpening based on fusion of restored structure and enhanced texture

控制与决策. 2022, 37(3): 635–644 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1336>

[基于前向-后向自校正扩散引导特征重建的图像融合](#)

An image fusion method using forward-backward self-correcting diffusion guided feature reconstruction

控制与决策. 2022, 37(8): 2134–2140 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.0219>

[自适应直觉模糊相异直方图裁剪的图像增强算法](#)

Adaptive intuitionistic fuzzy dissimilar histogram clipping image enhancement algorithm

控制与决策. 2021, 36(12): 2919–2928 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0845>

[基于双边分解与 \$L_1\$ 暗通道的战场图像增强算法](#)

A battlefield image enhancement algorithm based on bilateral decomposition and L_1 dark channel prior

控制与决策. 2021, 36(5): 1165–1172 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1213>

变压器油下图像增强算法

冯迎宾^{1†}, 刘文竹¹, 于伟经², 寇亚辉¹, 刘砚菊¹

(1. 沈阳理工大学 自动化与电气工程学院, 沈阳 110159;

2. 青岛超高清视频创新科技有限公司, 山东 青岛 266431)

摘要: 为解决变压器检测机器人在变质、变色的变压器油内部采集的图像存在色彩失真、对比度低等问题,提出一种变压器油下图像融合增强算法. 首先,利用完美反射算法对图像进行白平衡处理,以消除油下光照强度不均匀对图像颜色的影响,使得色彩更加均衡;然后,对色彩校正的图像进行自适应伽马校正,以提高图像的对比度;最后,采用多尺度融合策略将色彩校正后的图像与自适应伽马校正处理后的图像进行融合,得到变压器油下清晰的图像. 实验结果表明,经所提出算法处理后的变压器油下图像色彩鲜明、细节丰富,与原始图像相比,图像质量评价指标(UCIQE)、特征点匹配个数以及信息熵均有显著提高,能够为变压器内部故障检测提供清晰的数据.

关键词: 变压器油; 图像增强; 伽马校正; 完美反射法; 色彩校正; 机器视觉

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2021.1595

引用格式: 冯迎宾,刘文竹,于伟经,等. 变压器油下图像增强算法[J]. 控制与决策, 2023, 38(4): 1101-1108.

Image enhancement algorithm under transformer oil

FENG Ying-bin^{1†}, LIU Wen-zhu¹, YU Wei-jing², KOU Ya-hui¹, LIU Yan-ju¹

(1. College of Automation and Electrical Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China;

2. Qingdao Ultra HD Video Innovation Technology, Qingdao 266431, China)

Abstract: In order to solve the problems of color distortion and low contrast in the images collected by the transformer detection robot in the deteriorated and discolored transformer oil, an image fusion enhancement algorithm for transformer oil is proposed. Firstly, the image is white-balanced by the perfect reflection algorithm to eliminate the influence of uneven illumination intensity under oil on the image color and make the color more balanced. Then, the color-corrected image is subjected to adaptive gamma correction to improve the contrast of the image. Finally, the multi-scale fusion strategy is adopted to fuse the image after color correction and the image after adaptive gamma correction, and a clear image under transformer oil is obtained. The experimental results show that the images processed by this algorithm are bright in color and rich in details. Compared with the original images, the image quality evaluation index (UCIQE), feature point matching and information entropy are significantly improved, which can provide clear data for transformer internal fault detection.

Keywords: transformer oil; image enhancement; gamma correction; perfect reflection; color correction; machine vision

0 引言

随着油浸式变压器使用时间的增加,变压器发生故障的频率逐年升高. 受变压器内部充油、结构复杂、空间狭小等不利因素的影响,如何准确获取故障点位置是当前变压器故障检测领域待解决的难点问题^[1]. 为了解决故障点精准定位困难的问题,国内外学者设计了两款油浸式变压器内部巡检机器人^[2-3]. 由于视觉系统成本低且技术成熟,这两款机器人选择

通过视觉检测变压器内部故障. 但是,由于变压器油长期工作于高压、高温环境的变压器内部,变压器油存在变质、变色等问题,因此通过视觉系统获取的变压器内部结构图像存在对比度低、颜色失真等问题,这给变压器内部故障点的定位带来了新的挑战.

针对上述问题,本文主要研究在变压器油特殊环境下工作的机器人的视觉图像增强算法. 目前,国内外在变压器油环境下的图像增强算法较少见到相关

收稿日期: 2021-09-13; 录用日期: 2022-01-28.

基金项目: 中国博士后科学基金面上项目(2019M661127); 辽宁省自然科学基金指导项目(2019-ZD-0250).

责任编辑: 张文安.

[†]通讯作者. E-mail: 781787793@qq.com.

报道. 考虑到变压器油和水均属于流体介质, 且光在流体介质中的传播具有相似性, 因此, 本文主要参考水下图像处理算法.

水下图像处理算法主要分为基于物理模型法和非物理模型法两类. 基于物理模型的方法首先构建水下图像退化模型, 然后根据大量水下图像数据和模式识别方法估计模型参数, 最后通过反演退化方法获取清晰的水下图像. Trucco 等^[4]在 Jaffe-McGlamery 水下光学成像模型的基础上提出了可自行调节的图像复原滤波器; He 等^[5]提出了暗通道先验(DCP)算法, 该算法采用暗通道优先原则消除了单一输入图像中的模糊部分; Drews 等^[6]根据水下环境特点, 对 DCP 算法进行改进, 提出了水下暗通道先验(UDCP)算法; Galdran 等^[7]根据人造光源易导致复原后的图像出现局部亮度过高的情况, 提出了UDCP的改进算法, 即红通道水下图像复原(RUIR)算法; Peng 等^[8]通过对场景深度估计, 利用不同方法计算了深度图, 并根据具体情况合理选择深度图, 将其应用于水下成像模型.

上述几种基于物理模型的方法虽然能够在一定程度上改善水下图像质量, 但油浸式变压器内部环境与水下环境存在显著差异, 如变压器油内部杂质较少, 不存在杂质的后向散射, 故水下图像退化模型不能应用于变压器油图像处理过程. 此外, 由于当前油浸式变压器内部图像数据较少, 难以对油下图像退化过程进行建模.

非物理模型方法不需要建立复杂的水下光学成像模型, 仅通过图像增强算法调整图像的像素值以达到改善视觉效果的目的. Hitam 等^[9]提出了一种直方图算法, 该算法在 CLAHE 算法的基础上对水下图像的不同通道分别进行增强, 并对上述处理结果进行融合, 成功地抑制了 CLAHE 算法引起的噪声. Singh 等^[10]提出了基于递归曝光和基于递归分离曝光的子图像直方图均衡化图像增强方法, 这两种方法能够较好地应用于低曝光条件下获取的图像. Mercado 等^[11]提出了基于多尺度 Retinex 和反向颜色损失的暗图像增强算法, 该算法可适用于深海环境.

上述算法虽然在图像去雾和水下图像增强等领域中取得了良好的效果, 但算法的鲁棒性较差. 由于变压器内部是密闭空间, 不存在太阳光, 机器人在变压器内部仅能够依赖搭载的人造光源获取图像, 且变压器油长期工作于高温、高压环境下出现了变色、变质现象, 因此上述图像增强算法不能直接应用于变压器油下图像处理.

为了降低图像信息缺失给变压器内部故障检测带来的不利影响, 充分改善变压器油下图像的显示效果, 使得油下机器人对变压器故障检测的结果更加精准, 本文提出一种基于图像融合的增强算法. 首先, 对输入图像进行完美反射法白平衡处理, 校正图像色彩, 以解决图像色彩失真的问题; 然后, 引入自适应伽马校正, 对图像进行对比度调整, 从而获得高对比度的清晰图像; 最后, 分别计算色彩校正后的图像和对比度调整后的图像的显著性权重和亮度权重, 并将其进行归一化处理, 采用多尺度融合策略, 根据归一化处理后的权重将上述图像进行融合, 得到增强后的图像. 实验结果表明, 所提出算法能够充分改善油下图像色彩失真和对比度低等问题.

1 问题描述

机器人在进行变压器内部故障检测时, 通过变压器顶部的手孔进入变压器, 机器人搭载的相机对变压器内部故障点检测的成像模型如图1所示. 相机接收到的光由直接入射光分量、前向散射光分量和后向散射光分量组成. 直接入射光分量是待检测部件的反射光经过变压器油衰减后射入相机的光分量. 前向散射光分量是待检测部件的反射光进行了较小角度的散射后射入相机的光分量, 后向散射光分量是待检测部件的背景光经过变压器油中的颗粒散射后射入相机的光分量. 参考水下图像成像模型, 变压器油下成像模型为

$$I_i(x) = P_i(x) \times r_i(x) + B_i(1 - r_i(x)). \quad (1)$$

其中: I 为变压器油下光学图像, P 为期望图像, r 为光的透射率, B 为背景光, i 为颜色通道. 由于相机与变压器油下待测部件间距离较近, 可忽略前向散射分量.

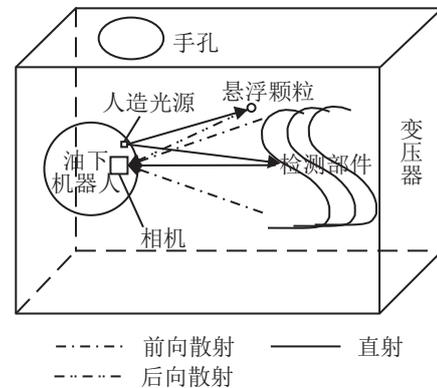


图1 变压器油下光学成像示意图

由图1可见, 变压器内部为充满变压器油的封闭空间, 机器人仅能够通过搭载的人造光源对空间内部的故障点进行检测. 假设人造光源发出的照射分量

为 L , L 经过视觉系统与目标的距离 d 传输衰减到达待检测部件表面, H 为到达待检测物件的入射光. 由于纯净的变压器油是微透明、淡黄色的, 而随着变压器油在变压器内部工作时间的延长, 变压器油会逐步变为浅褐色, 因此, 人造光源在不同年限的变压器油中的透射率为非固定常数, 难以通过构建油下成像模型解决油下图像存在的色彩失真和对比度低等问题.

2 算法流程

经过上述分析可知, 受变压器油介质变化因素的影响, 无法通过复原变压器油下光学成像模型提高油下图像质量. 鉴于此, 本文提出一种基于多尺度融合策略的图像增强算法.

所提出算法流程如图2所示, 具体如下.

step 1: 针对变压器图像存在的颜色失真问题, 对原始图像进行简单色彩平衡处理, 即对图像进行基于完美反射法的白平衡处理, 处理后的图像作为输入1;

step 2: 在输入1的基础上进行自适应伽马校正, 平滑调节各像素点, 提高图像整体对比度, 处理后的图像作为输入2;

step 3: 分别计算显著性权重(突出显著性区域, 提高全局对比度)和亮度权重(为亮度适中的区域提供更高的权值, 使得图像色彩更加均匀), 并对两种权重进行归一化处理;

step 4: 运用多尺度融合策略, 根据归一化处理后的权重将输入1与输入2相融合, 得到增强后的图像.

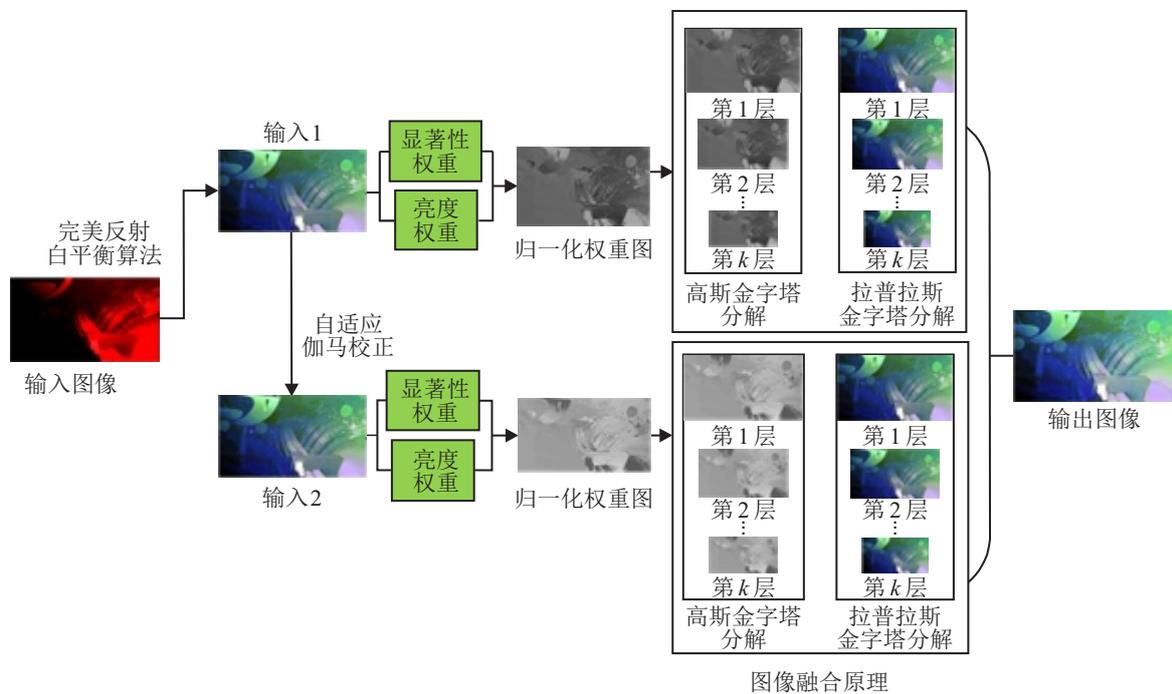


图2 算法框架

3 算法原理

3.1 色彩校正

由 Lambert-Beer 定律可知, 不同颜色的光在变色的变压器油衰减系数不同, 导致油下图像存在颜色失真问题^[12]. 为减少光对油下图像颜色的影响, 本文采取了基于完美反射算法的色彩校正方法, 该算法具有计算量小、响应速度快等优点^[13].

根据成像理论, 完美反射算法假设不同颜色的光源经纯白反射面反射后均会恢复原本的色彩, 在特定光源下, 设图像中亮度最高的点为白点, 其 R (红色通道)、 G (绿色通道)、 B (蓝色通道) 3 个色彩通道的值均为 255, 可通过将图片各通道的值归一化为最大值以完成白平衡校正. 完美反射算法步骤如下.

step 1: 统计原始图像 RGB 三通道之和的直方图, 并寻找图像中 R 、 G 、 B 三通道各自的最大值 R_{\max} 、 G_{\max} 、 B_{\max} (设图像大小为 $p \times q$), 如下式所示:

$$\begin{cases} R_{\max} = \max(R_{ij}), i = 1, 2, \dots, p, j = 1, 2, \dots, q; \\ G_{\max} = \max(G_{ij}), i = 1, 2, \dots, p, j = 1, 2, \dots, q; \\ B_{\max} = \max(B_{ij}), i = 1, 2, \dots, p, j = 1, 2, \dots, q. \end{cases} \quad (2)$$

其中: i 为像素行, j 为像素列, p 为图像像素总行数, q 为图像像素总列数.

step 2: 计算原始图像每个像素点 RGB 三通道之和的直方图, 并对直方图进行倒叙遍历, 找到数值位于前 10% 的像素点作为白点, 从而找到白点的阈值

T .

step 3: 将各像素点 R 、 G 、 B 之和大于 T 的像素求和, 并求取各通道的平均值, 得到 \bar{R} 、 \bar{G} 、 \bar{B} . 利用下式计算 RGB 三个通道的增益:

$$\begin{cases} K = \max(R_{\max}, G_{\max}, B_{\max}), \\ \text{gain}_R = K/\bar{R}, \\ \text{gain}_G = K/\bar{G}, \\ \text{gain}_B = K/\bar{B}. \end{cases} \quad (3)$$

其中: K 为各像素点 R 、 G 、 B 之和的最大值, gain_R 、 gain_G 、 gain_B 分别为 R 、 G 、 B 三通道的增益.

step 4: 利用下式修正图片像素点各通道的值, 修正结果以 R' 、 G' 、 B' 表示:

$$\begin{cases} R' = \text{gain}_R \times R, \\ G' = \text{gain}_G \times G, \\ B' = \text{gain}_B \times B. \end{cases} \quad (4)$$

利用基于完美反射的白平衡方法对原始图像进行上述处理后, 可修正图像色彩通道, 有效地均衡图像色彩, 解决由于色彩失真导致的图像信息不准确的问题.

3.2 对比度增强方法

由于机器人搭载的光源亮度有限, 且光在变压器油中衰减较快, 相机在变压器油中获取的图像普遍存在对比度低的问题. 本文采用自适应伽马校正方法提高图像对比度, 从而改善油下图像的质量. 伽马校正的原理^[14]为

$$G(I) = I^\gamma. \quad (5)$$

其中: γ 为伽马校正的调整参数, I 为输入图像. 由式 (5) 可知, 若 γ 采用固定参数, 则所有图像经伽马校正后获得的强度变化相同^[15-16]. 为了解决上述问题, 可定义概率密度函数如下:

$$G_{\text{pd}}(s) = \frac{n_s}{N}. \quad (6)$$

其中: n_s 为以 s 为强度的像素个数, N 为图像像素的总量. 由概率密度函数可构建如下分布函数:

$$D(s) = \sum_{k=0}^s G_{\text{pd}}(k). \quad (7)$$

通过以上概率密度和分布统计可得到图像的空间信息, 但存在不稳定的现象. 为了避免图像出现伪影, 利用下式对概率密度函数进行加权修正:

$$G_{\text{pdm}}(s) = G_{\max} \left(\frac{G_{\text{pd}}(s) - G_{\min}}{G_{\max} - G_{\min}} \right)^\delta. \quad (8)$$

其中: δ 为调整参数, G_{\max} 和 G_{\min} 分别为统计直方图的最大、最小概率密度. 根据修正后的概率密度函数

可得到修正后的分布函数, 如下所示:

$$D_m(s) = \frac{\sum_{s=0}^{s_{\max}} G_{\text{pdm}}(s)}{\sum_{s=0}^{s_{\max}} G_{\text{pdm}}(s)}. \quad (9)$$

由此建立如下自适应伽马校正方法:

$$\begin{cases} G(s) = s_{\max} \times \left(\frac{s}{s_{\max}} \right)^\gamma, \\ \gamma = 1 - D_m(s), \end{cases} \quad (10)$$

其中 s_{\max} 为强度最大值. 自适应伽马校正方法可根据得到的平滑曲线自动提高图像的对比度.

3.3 权重处理

为了进一步提高图像质量, 本文将颜色校正后的图像与对比度提高的图像进行融合, 采用的融合权重包括显著性权重和亮度权重.

3.3.1 显著性权重

为了区别图像中的物体与背景, 突出显著性区域, 增加输出图像的全局对比度, 本文采用了 Achanta 等^[17]提出的显著区域检测算法. 该方法计算如下:

$$W_S(x, y) = \|p_\mu - p_\varepsilon(x, y)\|. \quad (11)$$

其中: p_μ 为图像的特征向量, $p_\varepsilon(x, y)$ 为原始图像经过高斯模糊处理后对应的图像像素向量值.

3.3.2 亮度权重

为使图像细节更加丰富, 采用了亮度权重, 可为亮度效果较好的像素点分配更高的权值, 亮度权重图可用如下模型表示:

$$W_E(x, y) = \exp\left(-\frac{(p_g^m(x, y) - 0.5)^2}{2\sigma^2}\right). \quad (12)$$

其中: $p_g^m(x, y)$ 为输入图像 p_m 灰度图 p_g^m 的像素位置; σ 为标准偏差, 设置为 0.25.

3.3.3 归一化权重

对显著性权重和亮度权重进行归一化处理, 计算方法如下:

$$\begin{cases} \overline{W}_m(x, y) = \frac{W_m(x, y)}{\sum_m W_m(x, y)}, \\ W_m(x, y) = W_S(x, y) + W_E(x, y). \end{cases} \quad (13)$$

其中: $\overline{W}_m(x, y)$ 为所求的归一化权重, $W_m(x, y)$ 为显著性权重与亮度权重之和.

3.4 图像融合

为实现将不同来源的同一对象的图像数据在空间上进行配准, 并通过一定的权重算法将各图像数据中所含的信息优势相结合, 产生新的图像数据, 本文采取了多尺度的图像融合方法^[18-20]. 该方法能够减少对象或背景中可能存在的不完全性、不确定性和误差, 最大限度地利用各种图像信息源提供信息. 多尺

度的融合方法详细步骤如下。

step 1: 利用拉普拉斯算法将输入1图像和输入2图像分解为多尺度的拉普拉斯金字塔。

step 2: 利用高斯滤波算子将显著性权重图像和亮度权重图像分解为多尺度的高斯金字塔。

step 3: 将得到的拉普拉斯金字塔与高斯金字塔进行各尺度上的融合, 计算如下:

$$F_k(x, y) = \sum_m L_k[p_m(x, y)]G_k[\overline{W}_m(x, y)]. \quad (14)$$

其中: $F_k(x, y)$ 为最终输出的图像金字塔, k 为金字塔层数, m 为进行融合的图像数量, $L_k[p_m(x, y)]$ 表示将输入图像进行拉普拉斯金字塔分解, $G_k[\overline{W}_m(x, y)]$ 表示对标准化权重图进行高斯金字塔分解。

step 4: 将融合后的金字塔进行上采样操作, 得到输出图像。

4 实验测试

为检验所提出算法对油下图像增强的效果, 本文通过变压器内部检测机器人, 在深圳水贝供电站 220 kV 三菱变压器内部进行了测试。该变压器工作时长超过 20 年, 变压器油出现了严重的变色现象。同时, 为验证所提出算法的鲁棒性, 将机器人放入沈阳变压器研究院提供的模拟变压器内部进行了测试, 该

变压器内部的变压器油工作时间较短, 变压器油没有出现严重的变色现象。

查阅水下图像增强效果评价方法可知, 评价方法分为主观评价和客观评价。客观评价方法按照评测过程中有无参考图像可将评测方法分为全参考评测和无参考评测。由于变压器内部充满变压器油, 拍摄的变压器内部图像必然存在失真, 无法获取相应的参考图像。因此, 本文采用主观评价和无参考的客观评价方法。主观评价方法包括对各算法处理后的图像进行直观对比, 将经所提出算法增强后的图像与原图进行 RGB 直方图对比。无参考的评价方法主要包括水下彩色图像质量评价 (UCIQE)、信息熵等评价指标。为了验证所提出算法的有效性, 实验过程中与典型的水下图像增强算法进行了对比, 对比算法主要包括: 对尺度视网膜增强算法 (MSRCR)、自适应直方图均衡化 (CLAHE) 以及暗通道先验去雾 (DCP) 算法。

4.1 主观评价

在实验过程中, 选取了 4 张变压器内部结构图片, 其中 image 1 和 image 2 为 220 kV 三菱变压器内部结构, image 3 和 image 4 为模拟变压器内部结构, 实验结果如图 3 所示。image 1 和 image 2 图像出现了严重颜色失真, 色彩变暗现象。



图 3 变压器油下图片测试

由图 3 可见, 针对图像变暗的问题, 虽然 MSRCR 算法能够提高图像亮度, 但该算法不能解决颜色失真问题, 色彩补偿效果不佳, 导致图像呈灰白色。由于变压器油的散射和吸收效应, 图像整体偏暗红色和暗蓝色, 导致 DCP 算法不能通过暗通道图像估计图像透射率, DCP 算法应用于变压器油下图像增强效果不佳。CLAHE 增强了变压器内部图像的对比度和目

标的纹理特征, 使得目标与背景颜色易于区分, 但经 CLAHE 处理后图像仍存在颜色失真问题。所提出算法采用基于完美反射的白平衡方法, 通过红、绿、蓝各通道的均值实现对图片颜色的校正, 然后利用自适应伽马校正提高图像的对比度, 故能够有效地恢复变压器内部色彩失真图像。

将上述图像进行 RGB 直方图处理, 如图 4 所

示. 观察可知,经所提出算法处理后图像的直方图相较于原始图像的直方图的各种色彩通道灰度级整体有所增强,如图4(a)和图4(b)的绿色通道和蓝色通道的

灰度值不再集中于[0, 50],而是较为均匀地分布在整体的灰度空间;图4(c)和图4(d)的各通道灰度值均有所提升.

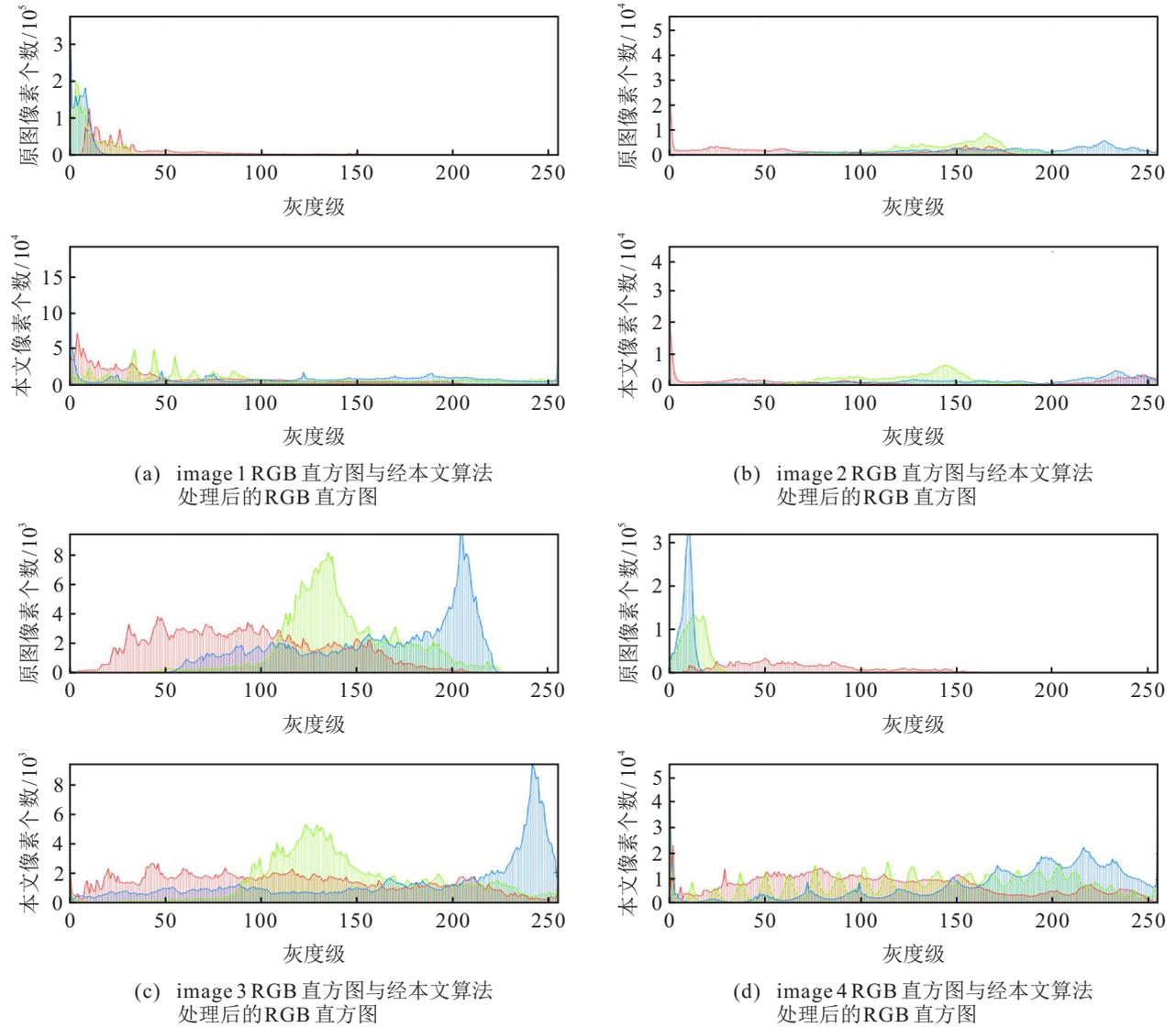


图4 RGB直方图测试

4.2 客观评价

1) UCIQE.

UCIQE 指标利用 CIELab 空间的色度、饱和度和清晰度加权线性组合评价水下彩色图像的质量,其表达式^[21]为

$$UCIQE = c_1\sigma_c + c_2\text{con}_l + c_3\mu_s. \quad (15)$$

其中: σ_c 为色度的标准差, con_l 为亮度的对比度, μ_s 为饱和度的平均值, c_1 、 c_2 、 c_3 为加权系数.

UCIQE 指标的取值范围为 [0, 1], 该值与图像质量成正比. UCIQE 指标值越大, 表明该图像在色度、饱和度和清晰度方面的效果越好.

表1为所提出算法和对比算法 UCIQE 评价指标的测评值. 由表1可见, 所提出算法处理后的图像,

UCIQE 指标测评值均高于常用的水下图像增强方法 MSRCR、CLAHE、DCP, 其值分别提高了约 22.61%、11.80%、14.92%. 相较于原图, 处理后的图像 UCIQE 测评值提高了约 22.45%. 实验结果表明, 所提出算法处理后的图像其色度、饱和度和清晰度方面均得到了明显改善.

表1 UCIQE评价指标测评值

| image | 原图 | MSRCR | CLAHE | DCP | 本文算法 |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | 0.5315 | 0.5749 | 0.5864 | 0.5556 | 0.6447 |
| 2 | 0.5172 | 0.5591 | 0.5816 | 0.5515 | 0.6323 |
| 3 | 0.5815 | 0.5677 | 0.6336 | 0.6499 | 0.7220 |
| 4 | 0.5541 | 0.4799 | 0.5907 | 0.5706 | 0.6758 |
| 平均 | 0.5461 | 0.5454 | 0.5981 | 0.5819 | 0.6687 |

2) 信息熵.

信息熵是由香农提出的描述信息源不确定度的评价指标^[22], 可描述被测图像的信息丰富度, 其计算如下:

$$H(s) = - \sum P(X) \log P(X), \quad (16)$$

其中 $P(X)$ 为随机变量 X 的输出概率函数. 信息熵的值越大, 表明图像越清晰.

表2为所提出算法和对比算法信息熵的测评值. 由表2可见, 所提出算法处理后的图像信息熵指标测评值相较于原图提高了约15.96%. 与MSRCR、CLAHE、DCP算法处理后的图像相比, 信息熵指标测评值分别提高了约5.55%、9.20%、21.27%.

表2 信息熵评价指标测评值

| image | 原图 | MSRCR | CLAHE | DCP | 本文算法 |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | 5.4735 | 7.4262 | 6.4972 | 4.8107 | 7.6083 |
| 2 | 6.0143 | 7.4515 | 6.8293 | 5.6349 | 7.8779 |
| 3 | 7.5492 | 7.5510 | 7.7500 | 7.5362 | 7.7181 |
| 4 | 7.5667 | 7.1046 | 7.5549 | 7.4052 | 7.8947 |
| 平均 | 6.7033 | 7.3649 | 7.1181 | 6.4097 | 7.7733 |

4.3 实验结果分析

本文分别通过主观评价和客观评价的方法验证了所提出算法对油下图像的增强效果. 从主观评价角度分析, 直接对比实验图像有利于直观验证算法是否达到了预期目的, 通过RGB直方图的方法观察图像则更有利于验证算法在色彩补偿方面的效果, 比直接观察图像更具科学性. 从客观评价角度分析, UCIQE和信息熵评价指标验证了所提出算法在色度、饱和度以及清晰度方面的优越性.

5 应用测试

本文研究变压器油下图像增强方法的目的: 1) 提高图像的清晰度; 2) 为构建变压器内部三维模型奠定技术基础. 通过主观评价和客观评价方法已表明了所提出算法可有效地提高图像的清晰度. 基于图像的特征匹配方法是三维环境模型构建方法之一. 为验证所提出算法处理后图像的特征匹配效果, 将原图旋转后采用加速稳健特征(SURF)匹配方法与原图像进行特征匹配^[23]. 在实验过程中, 所提出算法

表3 特征点匹配数量

| image | 原图 | MSRCR | CLAHE | DCP | 本文算法 |
|-------|------|-------|-------|-------|--------|
| 1 | 10 | 125 | 59 | 7 | 260 |
| 2 | 13 | 143 | 50 | 13 | 530 |
| 3 | 12 | 14 | 82 | 18 | 26 |
| 4 | 30 | 10 | 92 | 35 | 66 |
| 平均 | 14.5 | 41.75 | 68.75 | 16.75 | 137.75 |

处理后的图像与原图、MSRCR、CLAHE、DCP处理后的图像进行了特征点匹配对比实验, 实验结果如表3和图5所示. 由图5可见, 所提出算法处理后的图片特征点匹配数量约为原图的9.5倍, 特征点匹配数量约为MSRCR、CLAHE、DCP算法处理后图片的3.3倍、2倍、8.2倍.

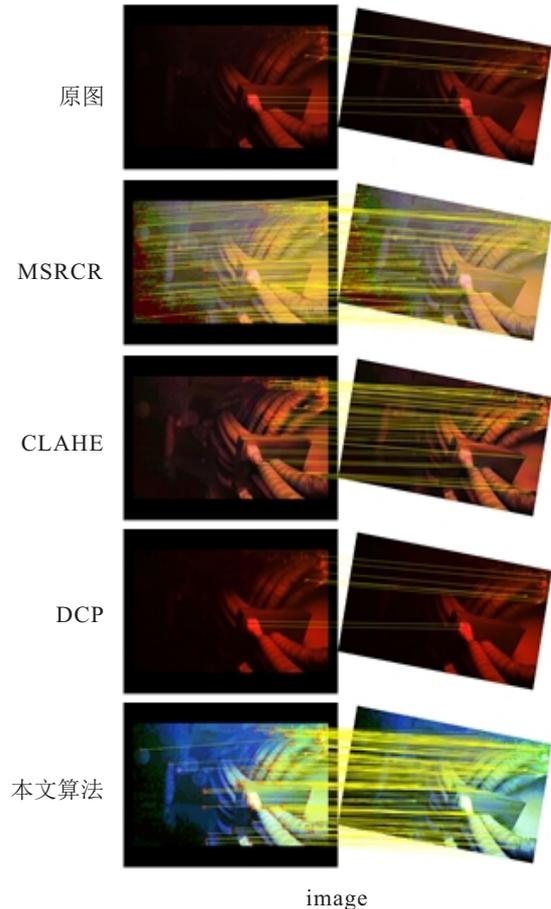


图5 特征匹配

6 结论

针对变压器油下图像存在色彩失真、对比度低的问题, 本文提出了基于多尺度融合的图像增强算法. 该算法无需构建复杂的变压器油下光学成像模型, 直接从原图像入手, 利用完美反射法对原图像进行白平衡处理, 从整体上校正图像色彩, 同时利用自适应伽马校正方法, 依据平滑曲线自动调整图像对比度. 在此基础上, 利用多尺度融合算法实现对上述图像的融合, 提高图像清晰度. 实验结果表明, 原图像经所提出算法处理后UCIQE测评值提高了约22.45%, 信息熵测评值提高了约15.96%, 特征点匹配数量提高了9.5倍. 虽然与对比算法相比, 所提出的图像增强算法效果较好, 但所提出算法存在运算时间长的问题. 在未来的研究中, 将着重研究如何简化运算过程, 提高算法运行速率, 以实现变压器检测机器人获取的图像实时处理.

参考文献(References)

- [1] 杨尚霄. 牵引变压器故障诊断方法综述[J]. 电子测量技术, 2021, 44(4): 110-117.
(Yang S X. A review of fault diagnosis methods for traction transformers[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2021, 44(4): 110-117.)
- [2] 冯迎宾, 赵小虎, 何震, 等. 油浸式变压器内部检测球形机器人的深度悬停控制研究[J]. 控制与决策, 2020, 35(2): 375-381.
(Feng Y B, Zhao X H, He Z, et al. Depth hover control of spherical robot for internal detection of oil-immersed transformer[J]. *Control and Decision*, 2020, 35(2): 375-381.)
- [3] Feng Y B, Liu Y J, Gao H W, et al. Hovering control of submersible transformer inspection robot based on ASMBBC method[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 76287-76299.
- [4] Trucco E, Olmos-Antillon A T. Self-tuning underwater image restoration[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2006, 31(2): 511-519.
- [5] He K M, Sun J, Tang X O. Single image haze removal using dark channel prior[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2011, 33(12): 2341-2353.
- [6] Drews Jr P, do Nascimento E, Moraes F, et al. Transmission estimation in underwater single images[C]. *IEEE International Conference on Computer Vision Workshops*. Sydney, 2013: 825-830.
- [7] Galdran A, Pardo D, Picón A, et al. Automatic red-channel underwater image restoration[J]. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2015, 26: 132-145.
- [8] Peng Y T, Cosman P C. Underwater image restoration based on image blurriness and light absorption[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2017, 26(4): 1579-1594.
- [9] Hitam M S, Awalludin E A, Jawahir Hj Wan Yusoff W N, et al. Mixture contrast limited adaptive histogram equalization for underwater image enhancement[C]. *International Conference on Computer Applications Technology*. Sousse, 2013: 1-5.
- [10] Singh K, Kapoor R, Sinha S K. Enhancement of low exposure images via recursive histogram equalization algorithms[J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2015, 126(20): 2619-2625.
- [11] Mercado M A, Ishii K, Ahn J. Deep-sea image enhancement using multi-scale retinex with reverse color loss for autonomous underwater vehicles[C]. *OCEANS 2017-Anchorage*. Anchorage, 2017: 1-6.
- [12] 王永鑫, 刁鸣, 韩闯. 最小二乘估计的水下图像恢复算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2018, 30(11): 2125-2133.
(Wang Y X, Diao M, Han C. Underwater image restoration algorithm based on least squares estimation[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2018, 30(11): 2125-2133.)
- [13] Gasparini F, Schettini R. Color balancing of digital photos using simple image statistics[J]. *Pattern Recognition*, 2004, 37(6): 1201-1217.
- [14] Huang S C, Cheng F C, Chiu Y S. Efficient contrast enhancement using adaptive gamma correction with weighting distribution[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2013, 22(3): 1032-1041.
- [15] Frosio I, Ferrigno G, Borghese N A. Enhancing digital cephalic radiography with mixture models and local gamma correction[J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 2006, 25(1): 113-121.
- [16] Huang Z H, Zhang T X, Li Q, et al. Adaptive gamma correction based on cumulative histogram for enhancing near-infrared images[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2016, 79: 205-215.
- [17] Achanta R, Hemami S, Estrada F, et al. Frequency-tuned salient region detection[C]. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Miami, 2009: 1597-1604.
- [18] Ancuti C O, Ancuti C. Single image dehazing by multi-scale fusion[J]. *IEEE Transactions on Image Processing: A Publication of the IEEE Signal Processing Society*, 2013, 22(8): 3271-3282.
- [19] Looney D, Mandic D P. Multiscale image fusion using complex extensions of EMD[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2009, 57(4): 1626-1630.
- [20] Ancuti C, Ancuti C O, Haber T, et al. Enhancing underwater images and videos by fusion[C]. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Providence, 2012: 81-88.
- [21] Yang M, Sowmya A. An underwater color image quality evaluation metric[J]. *IEEE Transactions on Image Processing: A Publication of the IEEE Signal Processing Society*, 2015, 24(12): 6062-6071.
- [22] Shannon C E. A mathematical theory of communication[J]. *The Bell System Technical Journal*, 1948, 27(3): 379-423.
- [23] Bay H, Ess A, Neubeck A, et al. Speeded-up robust features[J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2007, 110(3): 346-359.

作者简介

冯迎宾(1986—), 男, 副教授, 博士, 从事机器人环境感知、智能控制算法等研究, E-mail: 781787793@qq.com;

刘文竹(1998—), 女, 硕士生, 从事图像处理、目标识别的研究, E-mail: 825811700@qq.com;

于伟经(1987—), 女, 工程师, 硕士生, 从事视觉、图像处理算法的研究, E-mail: 531387046@qq.com;

寇亚辉(1992—), 女, 硕士生, 从事即时定位与地图构建的研究, E-mail: 314725071@qq.com;

刘砚菊(1965—), 女, 教授, 博士, 从事图像识别与增强算法等研究, E-mail: 6133292@qq.com.

(责任编辑: 魏冰)