

基于双域分解的夜间车辆红外图像研究

魏亮¹, 王炎², 胡文浩³, 吴卓鸿¹, 杨昊钧¹

(1. 云南云通司法鉴定中心, 云南昆明 650255; 2. 国家市场监督管理总局缺陷产品管理中心, 北京 100101;

3. 北京航空航天大学交通科学与工程学院, 北京 100101)

摘要: 夜间车辆交通红外图像光照不均, 导致车辆图像细节纹理较弱, 识别难度较大。为此, 提出基于双域分解的夜间车辆交通红外偏振图像增强方法。采用改进 Retinex 低照度图像光照补偿算法, 分解图像为低频图像与高频图像, 对低频图像去雾、优化其对比度, 对高频图像去噪与增强, 合成低频、高频图像实现夜间车辆交通红外偏振图像增强。实验测试结果证明, 对比传统方法, 所提方法增强后图像亮度与对比度得以优化, 且细节信息更丰富, 具有理想的视觉效果。

关键词: 双域分解; 夜间车辆; 红外偏振图像; 图像增强

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2021.11.022

Research on infrared image of vehicle at night based on dual domain decomposition

WEI Liang¹, WANG Yan², HU Wen-hao³, WU Zhuo-hong¹, YANG Hao-jun¹

(1. Yunnan Yuntong Judicial Expertise Center, Kunming 650255, China;

2. Defective Product Management Center of State Administration of Market Supervision and Administration, Beijing 100101, China;

3. School of Transportation Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100101, China)

Abstract: The uneven illumination of infrared images of vehicle traffic at night leads to the weak detail texture of vehicle images, which is difficult to be identified. Therefore, an infrared polarization image enhancement method based on dual domain decomposition is proposed. The improved Retinex low illumination image illumination compensation algorithm is used to decompose the image into low-frequency image and high-frequency image. The low-frequency image is defogged, and its contrast is optimized. Meanwhile, the high-frequency image is denoised and enhanced. Thus, the low-frequency and high-frequency images are synthesized to realize the infrared polarization image enhancement of vehicle traffic at night. The experimental results show that this method optimizes the brightness and contrast of the enhanced image, providing more detailed information compared to the traditional method, and has an ideal visual effect.

Keywords: dual domain decomposition; night time vehicle; infrared polarization image; image enhancement

1 引言

交通监控系统属于智能交通的核心手段之一, 通过交通监控系统监管车辆, 能够实现车辆交通的全天候管理。在现实应用中, 交通监控系统所采集

的交通红外偏振图像受低能见度(夜间)条件限制, 获取的红外偏振图像清晰度较低, 这对夜间车辆交通监控存在干扰^[1]。

目前已有大量学者专题研究图像增强问题, 王

基金项目: 国家市场监督管理总局资助项目“基于车辆事故深度调查的车辆缺陷分析判定技术应用研究”(No. ZL-ZHGL-2020013)资助。

作者简介: 魏亮(1986-), 男, 本科, 中级工程师, 主要从事交通事故鉴定及声像及电子数据鉴定等工作。E-mail:

收稿日期: 2021-02-26; **修订日期:** 2021-03-26

峰萍等人提出基于改进 Retinex 的城市交通图像增强方法,提高图像具有色彩保真的优势,但增强的图像存在光晕问题^[2];曹锦纲等人提出基于生成式对抗网络的道路交通模糊图像增强方法,增强后图像细节性显著,但是生成图像和原始图像相比存在差距,网络结构和调整参数还需优化^[3]。

为解决传统方法存在的问题,提出基于双域分解的夜间车辆交通红外偏振图像增强方法,以提升夜间车辆交通红外偏振图像质量。

2 基于双域分解的夜间车辆交通红外偏振图像增强方法

2.1 改进的 Retinex 低照度图像光照补偿算法

因夜间车辆交通红外偏振图像采集于夜间,这对夜间车辆交通红外偏振图像增强效果存在一定影响^[4-5]。为此,本文把原始的夜间车辆交通红外偏振图像在 RGB 空间变换至 Lab 颜色空间,色度分量 a 与 b 保持原始状态,使用改进的 Retinex 算法处理亮度分量 L ,以此保证夜间车辆交通红外偏振图像色彩具有恒常性,优化边缘模糊性。通过全局矫正方法,对图像完成线性拉伸,将拉伸后图像变换至 RGB 空间实现光照补偿^[6]。

2.1.1 RGN 空间和 Lab 空间变换

RGB 空间无法直接变换至 Lab 空间,需先变换到 XYZ 空间后再变换至 Lab,则 RGB-XYZ-Lab。夜间车辆交通红外偏振图像自 RGB 至 XYZ 的变换方法为:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = N \cdot \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中,

$$N = \begin{bmatrix} 0.4124 & 0.3576 & 0.1805 \\ 0.2126 & 0.7152 & 0.0722 \\ -0.0193 & 0.1192 & 0.9505 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, N 为变换矩阵。夜间车辆交通红外偏振图像自 XYZ 空间至 Lab 空间的转换方法为:

$$\begin{cases} L = 116g(Y_1) - 16 \\ a = 500(g(X_1) - g(Z_1)) \\ b = 200(g(Y_1) - g(Z_1)) \end{cases} \quad (3)$$

式中, g 代表变换函数; X_1 、 Y_1 、 Z_1 分别代表 X 、 Y 、 Z

分量归一化值。

2.1.2 亮度分量估计

传统 Retinex 算法利用高斯滤波估计图像的亮度分量,图像边缘处将存在泛白、光晕问题^[7]。本文使用引导滤波方法估计夜间车辆交通红外偏振图像亮度分量:

$$R(\phi, \varphi) = \lg L(\phi, \varphi) - \lg K(L(\phi, \varphi)) \quad (4)$$

式中, $R(\phi, \varphi)$ 为亮度分量; $L(\phi, \varphi)$ 为原始图像变换至 Lab 空间后的反射分量; K 为引导滤波函数。

变换后的输出图像 p_j 为:

$$p_j = \sum_j V_{ij}(J)q_j \quad (5)$$

式中, J 为图像引导系数; q_j 为输入图像; V_{ij} 表示权重。引导滤波可输出局部线性算子:

$$G = \varphi_k p_j \quad (6)$$

式中, φ_k 表示夜间车辆交通红外偏振图像滤波窗口 ω_k 的线性系数。线性系数 φ_k 计算方法是:

$$\varphi_k = \frac{\frac{1}{|\omega|} \sum_{j \in \omega_k} L_j^2 - \beta_k^2}{\alpha_k^2 + \delta} \quad (7)$$

式中,滤波窗口 ω_k 像素数量为 ω ;窗口 ω_k 像素均值与标准差依次是 β_k^2 、 α_k^2 ; δ 表示正则化参数^[8]。引导滤波函数处理图像的输出结果是:

$$K_j(L(\phi, \varphi)) = G \cdot \frac{1}{|\omega|} \sum_{j \in \omega_k} (\varphi^k L_j(\varphi)) \quad (8)$$

式中, $K_j(L(\phi, \varphi))$ 为引导滤波函数处理后图像。把式(8)导进式(4)便可以获取反射图像 $R(\phi, \varphi)$ 。

2.1.3 全局矫正

使用式(9)对 $R(\phi, \varphi)$ 线性量化,让图像对比度变换至能够显示的区域中,实现图像光照补偿:

$$R(\phi, \varphi) = 100 \frac{R(\phi, \varphi) - \min(\min R(\phi, \varphi))}{\max(\max R(\phi, \varphi)) - \min(\min R(\phi, \varphi))} \quad (9)$$

式中, $R(\phi, \varphi)$ 即为光照补偿矫正后夜间车辆交通红外偏振图像。

2.2 基于双域分解的图像增强算法

2.2.1 双边滤波器

与高斯滤波器对比,双边滤波器降噪性能显著,边缘轮廓留存性能显著^[9-10]。双边滤波器分解噪

声的方法为:

$$g_{LP} = \frac{\sum_{i \in M_v} h_{i,j} g_v}{\sum_{j \in M_v} h_{i,j}} \quad (10)$$

$$h_{i,j} = \exp\left(-\frac{|i-j|^2}{2\theta_s^2}\right) \times \exp\left[-\frac{(g_u - g_v)^2}{\mu_s \theta^2}\right] \quad (11)$$

其中, M_v 为光照补偿后夜间车辆交通红外偏振图像 $R(\phi, \varphi)$ 中以 j 像素点为中心点、 s 为半径的方形窗口; 在 M_v 中设置双边滤波器核函数 $h_{i,j}$, θ_s^2 , μ_s 分别为核函数 $h_{i,j}$ 空域参数、值域参数; 噪声方差为 θ^2 ; g_{LP} 表示双边滤波器输出的 j 点灰度值是; i 点 j 点像素值噪声分别为 g_u , g_v 。

图像 $R(\phi, \varphi)$ 通过双边滤波器滤波后, 可获取低频图像 g_L 与高频图像 g_H , 具体如下式所示:

$$\begin{cases} g_L = \sum_{i \in M_v} g_{LP} \\ g_H = R(\phi, \varphi) - g_L \end{cases} \quad (12)$$

2.2.2 低频图像去雾

使用雾霾天气退化模型抑制低频图像基础层的雾气, 获取无雾的低频图像 g_L :

$$g_L = g_o \times R_x + B[1 - R_x] \quad (13)$$

式中, g_o , R_x , B 依次为去雾后低频图像、透射率、周围环境大气光。

无雾的低频图像里存在某个颜色通道灰度值为较小^[11]。因此, 无雾的低频图像存在式(14)的暗原色 I^{dark} :

$$I^{\text{dark}} = \min_{\tilde{\omega}_k} \{ \min_d I^d \} \quad (14)$$

式中, d 为颜色通道; I^d 为颜色通道的颜色向量。

暗原色先验理论表示, 无雾的低频图像暗原色 I^{dark} 值为 0, 此时夜间环境中, 大气光 \tilde{B}_o 与环境大气光 B^d 估计结果为:

$$\tilde{B}_o = \min[\min(\eta \cdot I_m^{\text{dark}}, \zeta) \cdot I_m^{\text{dark}}, I^{\text{dark}}] \quad (15)$$

$$B^d = \frac{1}{2} \max_d [\max(I^d)] + \max(I_m^{\text{dark}}) \quad (16)$$

式中, 暗原色 I^{dark} 的暗原色矩阵为 I_m^{dark} ; B^d 表示各颜色通道周围环境大气光; η, ζ 分别为去雾度、大气

光的控制参数下限。

去雾后低频图像的颜色通道的颜色向量 I^d 为:

$$I^d = \frac{B^d - \tilde{B}_o}{1 - \tilde{B}_o/B^d} \quad (17)$$

如果去雾后低频图像灰度最大值为 g_{LDHmax} ; 最小灰度值为 g_{LDHmin} , 那么利用 Gamma 变换方法实现低频图像增强。增强后低频图像为:

$$g_{LE} = g_{\text{LDHmax}} \left(\frac{g_{\text{LDHmin}}}{g_{\text{LDHmax}} - g_{\text{LDHmin}}} \right) \quad (18)$$

2.2.3 高频降噪与增强

夜间车辆交通红外偏振图像存在大量噪声, 增强高频图像 g_H 之前需要去噪, 若不去噪, 直接增强将会放大噪声^[12-14]。

采用非下采样剪切波变换分解高频图像 g_H 。获取 g_H 剪切波变换域的分解系数 $g_{\text{HCj},l}$, 对 $g_{\text{HCj},l}$ 收缩处理, 获取基础收缩系数 g_{HC1} :

$$g_{\text{HC1}} = \begin{cases} g_{\text{HCj},l} & |g_{\text{HCj},l}| > \partial_j \hat{\rho} \hat{\rho}_{j,l} \\ \Phi(g_{\text{HCj},l}) & |g_{\text{HCj},l}| \leq \partial_j \hat{\rho} \hat{\rho}_{j,l} \end{cases} \quad (19)$$

式中, 噪声点标准方差为 ρ ; 不同尺度和方向滤波器分解系数矩阵里存在的噪声比例为 $\hat{\rho}_{j,l}$; $\Phi(g_{\text{HCj},l})$ 为连续单调增函数; ∂_j 表示阈值系数。

且噪声点标准方差 ρ 的计算方法为:

$$\rho = \frac{\text{median}(|V_{d1}|)}{0.6745} \quad (20)$$

式中, V_{d1} 是高频子带系数。

将 g_{HB} 完成分解, 通过 g_{HB} 的分解系数矩阵集 C_{EC2} 将 $g_{\text{HCj},l}$ 完成最终收缩, 获取噪声抑制后收缩系数集 g_{HC2} , 将 g_{HC2} 进行非下采样的剪切变换, 获取去噪后高频图像 g_{HD} :

$$g_{\text{HD}} = \frac{|V_{d1}|^2}{|V_{d1}|^2 + (\partial_j \hat{\rho} \hat{\rho}_{j,l})^2} \quad (21)$$

g_{HD} 的高频纹理细节增强和边缘检测算子存在显著关联性, 一阶微分算子提取的边缘信息效果显著, 但不具有明确方向性, 无法获取非规则边缘^[15]。为有效获取非规则边缘信息, 使用二阶微分算子, 获取 g_{HD} 边缘信息并增强。

$$g_{\text{HDj},l}(a_o, b_o) = \frac{1}{6} [26g_{\text{HDj},l}(a_o, b_o) - 4g_{\text{HDj},l}(a_o, b_o - 1) - 4g_{\text{HDj},l}(a_o, b_o + 1) - g_{\text{HDj},l}(a_o - 1, b_o - 1) - 4g_{\text{HDj},l}(a_o - 1, b_o) - g_{\text{HDj},l}(a_o - 1, b_o + 1) - g_{\text{HDj},l}(a_o + 1, b_o - 1) - 4g_{\text{HDj},l}(a_o + 1, b_o) - g_{\text{HDj},l}(a_o + 1, b_o + 1)] \quad (22)$$

式中, a_o, b_o 依次是分解系数矩阵行数与列数。

2.2.4 图像合成与模糊抑制

联合 g_{LE}, g_{HD} 合成增强图像 g_{OE} , 使用模糊抑制算子, 抑制 g_{OE} 模糊性, 获取最终增强图像 g_{DE} :

$$g_{DE} = (g_{OE})^{\Omega^d + \psi^d} \quad (23)$$

式中, Ω^d, ψ^d 分别为颜色比例因子、色彩调整因子。

3 实验分析

实验环境为 Matlab R2019a 编程, 电脑配置为: 处理器 Inter(R) Core(TM) i7, 主频与内存依次是 3.0 GHz、8 GB, 实验对象为某停车场夜间车辆。

3.1 图像光照补偿效果

图 1 为某停车场夜间车辆红外偏振图像, 从视觉角度分析可直观看出, 此图像光照不足, 图像细节信息不显著, 使用本文方法对其进行图像光照补偿, 补偿效果如图 2 所示。



图 1 某停车场夜间车辆红外偏振图像

Fig. 1 Infrared polarization image of vehicles in a parking lot at night



图 2 本文方法应用后

Fig. 2 After the application of the proposed method

从主观视觉角度分析图 1 与图 2 可知, 本文方法对图 1 进行光照补偿后, 该停车场夜间车辆红外偏振图像视觉效果更佳, 可清晰看出各个车辆停靠位置。

3.2 图像增强效果

使用本文方法对夜间车辆红外偏振图像进行图像增强, 以图 2 为例, 为验证本文方法增强效果, 以文献[2]方法提出的基于改进 Retinex 的城市交通图像增强方法、文献[3]提出的基于生成式对抗网络的道路交通模糊图像增强方法为对比方法, 对比三种方法对夜间车辆交通红外偏振图像的增强效果, 结果如图 3 所示。



(a) 本文方法增强效果



(b) 文献[2]方法



(c) 文献[3]方法

图 3 三种方法增强效果视觉对比图

Fig. 3 Visual contrast of three methods for enhancing effect

三种方法对同一个夜间车辆交通红外偏振图像增强后, 差异较为明显。对比之下, 本文方法增强后

图像的视觉效果最好,夜间车辆交通红外偏振图像中细节清晰,文献[2]方法增强后图像存在光晕问题,文献[3]方法虽然不存在光晕问题,但是增强后图像的视觉效果劣于本文方法。由此可知,从视觉角度分析,本文方法增强后夜间车辆交通红外偏振图像更具优势。

为深入验证本文方法增强效果,通过亮度均值 O_1 、标准差 O_2 、信息熵 O_3 测试三种方法应用性能。已知某夜间车辆交通红外偏振图像亮度均值是 50。

(1) 亮度均值

$$O_1 = \frac{\sum_{i=1}^{a_o} \sum_{j=1}^{b_o} L(i,j)}{a_o \times b_o} \quad (24)$$

式中, $L(i,j)$ 、 a_o 、 b_o 分别为夜间车辆交通红外偏振图像像素点 (i,j) 亮度、行数、列数。

三种方法增强后夜间车辆交通红外偏振图像的亮度均值越大,代表图像整体偏亮;亮度均值较小,代表夜间车辆交通红外偏振图像整体偏暗。亮度均值越大,代表图像增强效果越好。三种方法增强后,夜间车辆交通红外偏振图像的亮度均值对比结果如图 4 所示。

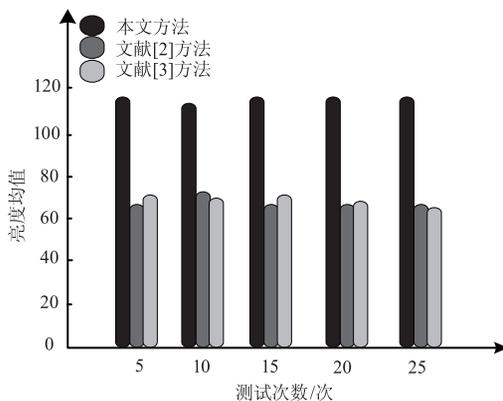


图 4 亮度均值对比结果

Fig. 4 Comparison results of brightness mean

根据图 4 可知,三种方法增强后夜间车辆交通红外偏振图像的亮度均值之间差异显著,本文方法增强后的夜间车辆交通红外偏振图像亮度均值高达 115,文献[2]方法、文献[3]方法增强后的夜间车辆交通红外偏振图像亮度均值均低于 80,文献[2]方法、文献[3]方虽然也提高了原始夜间车辆交通红外偏振图像亮度,但是提升效果没有本文方法显著。

(2) 标准差

$$O_2 = \sqrt{\frac{1}{a_o b_o} \sum_{i=1}^{a_o} \sum_{j=1}^{b_o} [L(i,j) - O_1]^2} \quad (25)$$

标准差能够描述夜间车辆交通红外偏振图像的对比度,标准差较大,夜间车辆交通红外偏振图像对比度显著,图像增强效果较好。三种方法增强后,夜间车辆交通红外偏振图像的标准差对比结果如图 5 所示。

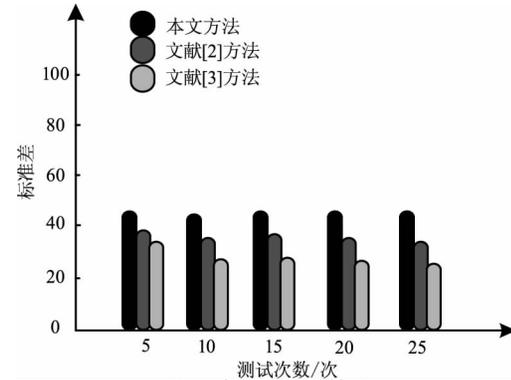


图 5 标准差对比结果

Fig. 5 Standard deviation comparison results

图 5 中,三种方法对比之下,本文方法对夜间车辆交通红外偏振图像增强后,标准差大于 40,文献[2]方法、文献[3]方法增强效果不如本文方法,标准差低于 40,对比之下,本文方法增强下,夜间车辆交通红外偏振图像对比度得以提升,效果更佳。

(3) 信息熵

$$O_3 = - \sum_{i=1}^{b_o} g_{HI} \log_2 g_{HI} \quad (26)$$

式中, g_{HI} 为灰度级概率值。

信息熵可描述图像信息量,信息熵较大,表示图像信息量较多,信息熵较小,表示图像信息较小;信息熵较小,则增强图像后信息出现流失,增强效果较差。三种方法增强后,夜间车辆交通红外偏振图像信息熵对比结果如图 6 所示。

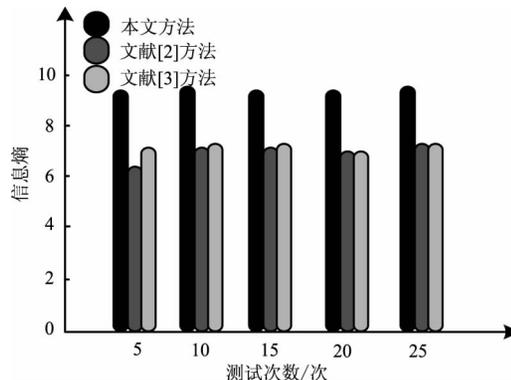


图 6 信息熵对比结果

Fig. 6 Comparison results of information entropy

图6中本文方法对夜间车辆交通红外偏振图像增强后,图像信息熵大于9,相比之下,文献[2]方法、文献[3]方法增强后,夜间车辆交通红外偏振图像的信息熵较小,本文方法增强效果更佳,图像细节信息更丰富。

4 结论

本文针对夜间车辆交通红外偏振图像,提出基于双域分解的夜间车辆交通红外偏振图像增强方法,此方法可以有效实现夜间车辆交通红外偏振图像增强。通过实验测试,本文方法相比于传统方法,可以更好地保持图像细节信息,对夜间车辆交通红外偏振图像具有更显著的增强效果,使用价值显著。

参考文献:

- [1] Gong Jian, Lü Junwei, Liu Liang. Target enhancement of infrared polarization image based on color space fusion and context-aware saliency[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(10): 23-32. (in Chinese)
宫剑,吕俊伟,刘亮. 基于颜色空间融合与上下文显著性的红外偏振图像目标增强[J]. 光学学报, 2019, 39(10): 23-32.
- [2] Wang Fengping, Wang Weixing, Yang Nan, et al. An urban traffic image enhancement method based on modified Retinex[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2017, 17(5): 53-59. (in Chinese)
王峰萍,王卫星,杨楠,等. 基于改进 Retinex 的城市交通图像增强[J]. 交通运输系统工程与信息, 2017, 17(5): 53-59.
- [3] Cao Jingang, Li Jinhua, Zheng Guping. Enhancement of blurred road-traffic images based on generative adversarial network [J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2020, 15(3): 491-498. (in Chinese)
曹锦纲,李金华,郑顾平. 基于生成式对抗网络的道路交通模糊图像增强[J]. 智能系统学报, 2020, 15(3): 491-498.
- [4] Li Weikai, Wang zhengxia, Jiang Wei. An adaptive fractional-order partial differential image enhancement model [J]. Computer Engineering & Science, 2018, 40(4): 699-706. (in Chinese)
- 李伟凯,王政霞,蒋伟. 一种自适应分数阶偏微分图像增强模型[J]. 计算机工程与科学, 2018, 40(4): 699-706.
- [5] Yu Jiang, Liu Pengzu, Rong Xiaolong, et al. Dehazing and enhancement research of polarized image based on dark channel priori principle [J]. Laser & Infrared, 2020, 50(4): 493-500. (in Chinese)
游江,刘鹏祖,容晓龙,等. 基于暗通道先验原理的偏振图像去雾增强算法研究[J]. 激光与红外, 2020, 50(4): 493-500.
- [6] Zhang Lei, Yang Fengfeng, Ji Lina. Multi algorithm fusion of infrared polarization and intensity image based on difference feature exponential measure [J]. Fire Control & Command Control, 2018, 43(2): 49-54, 59. (in Chinese)
张雷,杨风暴,吉琳娜. 差异特征指数测度的红外偏振与光强图像多算法融合[J]. 火力与指挥控制, 2018, 43(2): 49-54, 59.
- [7] Xu Fenglin, Miao Yubin, Zhang Ming. Navigation image enhancement based on color weighted guided image filtering-retinex algorithm [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2019, 53(8): 921-927. (in Chinese)
许凤麟,苗玉彬,张铭. 基于彩色加权引导滤波-Retinex 算法的导航图像增强[J]. 上海交通大学学报, 2019, 53(8): 921-927.
- [8] Zhang Chi, Tan Nanlin, Li Xiang, et al. Foggy image enhancement technology based on improved Retinex algorithm [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45(2): 309-316. (in Chinese)
张驰,谭南林,李响,等. 基于改进型 Retinex 算法的雾天图像增强技术[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(2): 309-316.
- [9] Gong Jian, Lü Junwei, Liu Liang, et al. Adaptive scale local contrast detection for infrared polarization ship targets [J]. Optics and Precision Engineering, 2020, 28(1): 223-233. (in Chinese)
宫剑,吕俊伟,刘亮,等. 红外偏振舰船目标自适应尺度局部对比度检测[J]. 光学精密工程, 2020, 28(1): 223-233.
- [10] Guo Qian, Zhu Zhenfeng, Chang Dongxia, et al. Backlight image enhancement by fusing global and local region brightness [J]. Journal of Signal Processing, 2018, 34(2): 140-147. (in Chinese)
郭倩,朱振峰,常冬霞,等. 融合全局与局部区域亮度

- 的逆光图像增强算法[J]. 信号处理, 2018, 34(2): 140 - 147.
- [11] Zhu Pan, Liu Zeyang, Huang Zhanhua. Infrared polarization and intensity image fusion based on dual-tree complex wavelet transform and sparse representation[J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(12): 213 - 221. (in Chinese)
朱攀, 刘泽阳, 黄战华. 基于 DTCWT 和稀疏表示的红外偏振与光强图像融合[J]. 光子学报, 2017, 46(12): 213 - 221.
- [12] Mohanapriya N, Kalaavathi B. Adaptive image enhancement using hybrid particle swarm optimization and watershed segmentation[J]. Intelligent Automation and Soft Computing, 2019, 25(4): 663 - 672.
- [13] Kong Xiangyang, Zhao Yongqiang, Peng Qun, Nie, et al. Infrared polarization image enhancement algorithm based on mutual structure regularization constraint[J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(5): 160 - 165. (in Chinese)
孔祥阳, 赵永强, 彭群聂, 等. 基于互结构正则约束的红外偏振图像增强算法[J]. 光子学报, 2020, 49(5): 160 - 165.
- [14] Dhal K G, Ray S, Das S, et al. Hue-preserving and gamut problem-free histopathology image enhancement[J]. Iranian Journal of Science and Technology-Transactions of Electrical Engineering, 2019, 43(3): 645 - 672.
- [15] Lazzaro D, Morigi S, Melpignano P, et al. Image enhancement variational methods for enabling strong cost reduction in OLED-based point-of-care immunofluorescent diagnostic systems[J]. Communications in Numerical Methods in Engineering, 2018, 34(3): 1 - 17.