

图文信息技术

基于 NSST 多尺度自适应的 Retinex 低照度图像增强算法

王晓红¹, 翟焱修¹, 麻祥才²

(1.上海理工大学, 上海 200093; 2.上海出版印刷高等专科学校, 上海 200093)

摘要: **目的** 在对低照度图像进行增强时, 针对传统频率域方法由于尺度不够丰富而不能很好保留图像高频细节的问题, 提出一种基于 NSST 多尺度自适应的 Retinex 低照度图像增强算法。**方法** 首先将低照度图像转化至 HSI 颜色空间后, 单独对 I 通道进行处理, 实现对图像色彩信息的保真效果; 然后对 I 通道进行 Retinex 算法得到反射分量, 从而去除照度信息对图像亮度的影响; 对反射分量进行伽马调整后, 进行基于 L_a (平均亮度)、 P_a (平均对比度)、 I_a (信息熵) 等 3 个特征值的自适应 NSST 分解, 从而得到最佳参数的高频分量。**结果** 在主观观察和客观无参考图像质量评价中, 文中算法的增强效果和评价得分都要优于其他算法。**结论** 经过自适应参数优化之后, 低照度图像的对比度得到了提高, 可视性和图像质量都得到了显著提升。

关键词: 低照度图像增强; Retinex; 自适应 NSST

中图分类号: TS801.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2020)03-0211-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.03.033

Retinex Low Light Image Enhancement Algorithm Based on Multi-Scale Adaptive NSST

WANG Xiao-hong¹, ZHAI Yan-xiu¹, MA Xiang-cai²

(1.University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2.Shanghai Publishing and Printing College, Shanghai 200093, China)

ABSTRACT: The work aims to propose the Retinex low light image enhancement algorithm based on multi-scale adaptive NSST, regarding the problem that the traditional frequency domain method cannot properly keep the high-frequency details of the image due to the insufficient scale in low light image enhancement. Firstly, after the low light image was transformed into HSI color space, I channel was processed separately to achieve the fidelity effect of image color information. Then, the reflection component of I channel was obtained by Retinex algorithm, so as to remove the influence of illuminance component on image brightness. After gamma adjustment of the reflection component, based on L_a (average brightness), P_a (average contrast) and I_a (information entropy), the best high frequency component was obtained by the adaptive NSST decomposition. In subjective observation and objective non reference image quality evaluation, the enhancement effect and evaluation score of the proposed algorithm were better than other algorithms. After the optimization of adaptive parameters, the contrast of low light image is improved, and the visibility and image quality are improved.

KEY WORDS: low light image enhancement; Retinex; adaptive NSST

收稿日期: 2019-10-16

基金项目: 上海市出版印刷高等专科学校柔板印刷绿色制版与标准化实验室资助项目 (ZBKT201809); 上海市教育发展基金会和上海市教育委员会“晨光计划” (18CGB09)

作者简介: 王晓红 (1971—), 女, 上海理工大学教授, 主要研究方向为数字图像信息处理与色彩再现理论及深度学习。

环境光暗淡、曝光不足、照度低等原因都会产生图像对比度低、整体亮度暗、噪声大等问题,而这样的图像不仅可视性差,也不适用之后的机器视觉处理。经过图像增强算法预处理之后,既可以增强图像的可视性,便于人眼的观察,也利于后期图像分类、图像分割等深层次的机器视觉处理。

近年来,在低照度图像增强领域中出现较多的是空间域的图像增强方法,例如直方图均衡算法(HE)^[1]、灰度变化法^[2]、反锐化掩膜法^[3]等。这些方法可以快速、直观地对图像进行处理,提高了对比度,增强了主观视觉效果,但是在处理过程中都会产生噪声,抑制噪声时又会导致色偏等新的问题^[4]。

由于基于色彩恒常性理论的 Retinex 算法可以去除图像的照度分量,得到反映图像信息的反射分量,因此被广泛应用于低照度图像增强中。现有的 Retinex 算法通过对照度分量和反射分量的分别处理来实现图像的增强。文献[5]通过对照度分量平滑处理和反射分量的降噪处理实现增强过程,平滑处理在提高图像整体对比度的同时,使图像丢失了很多细节。文献[6]单独对照度分量进行估计,并通过增广拉格朗日乘子对照度分量进行重构,由于未考虑反射分量,导致图像在高频部分丢失了很多细节。文献[7]分别对照度分量和反射分量进行范数约束和梯度保真,从而实现图像照度和细节的增强,但由于缺少对图像多尺度信息的考虑,对图像细节增强不足。文献[8]通过获取低照度图像灰度分布实现自适应图像增强,图像视觉效果得到提升,但整体对比度提高不足,图像高频信息丢失。

通过将图像变化至频率域,可以将高频细节信息和噪声分离开来分别处理,相比空间域的处理方法抑制了噪声、扩大了算法的适用范围。于是将图像进行频率域图像增强方法逐渐成为研究的热点之一^[9]。其中运用较为广泛的是基于小波的频率域变换(WD),但小波变换具有尺度单一、细节提取能力差、增强效果粗糙等缺点。在此之后,ridgelet 变换^[10]、contourlet 变换^[11]和 curvelet 变换^[12]等变换方法先后被用来进行图像的频率域增强,然而传统的频率域变换在尺度上不够丰富且计算量大。由此,在 contourlet 变化的基础上,文献[13]提出了 shearlet 变换,解决上述频率域变换尺度丰富性不够的问题,但会导致吉布斯(Gibbs)失真。文献[14]又将其改进为非下采样剪切波变换(Non-subsampled Shearlet Transform),该方法具有多尺度、可以避免 Gibbs 失真等特点。文献[15]通过 NSST 分解和模糊增强实现了对遥感图像的增强,在提高图像对比度的同时,突出了边缘细节。文献[16]结合 NSST 分解和滤波器增强遥感图像,去除了噪声,提高了清晰度,并保持了图像的边缘信息。

基于上述原因,为更好地实现低照度图像的增强,优化多尺度的参数特征,文中在 HSI 颜色空间下,

对 I 通道进行 Retinex 算法获取反射分量,通过 NSST 将反射分量转换到频率域进行处理,通过图像质量特征参数和权重设置对 NSST 变化尺度进行控制,从而实现 NSST 尺度上的优化,进一步实现低照度图像自适应的增强。

1 基本理论

1.1 HSI 颜色空间

在 HSI 颜色空间中,将颜色分为亮度、色调、饱和度。其中,通道 I(Intensity)独立于图像彩色信息,反映颜色明亮程度的强度,通道 H(Hue)是反映色彩本质的色调,通道 S(Saturation)是一种反应纯色被白光稀释的程度的描述。HSI 颜色空间更利于根据人眼的视觉特性对图像进行处理,在诸多低照度图像增强算法中,常将图像转化至 HSI 颜色空间进行增强操作^[17]。

1.2 Retinex 算法原理

Retinex 算法^[18]认为人眼所看到的图像,可以看作是照度分量和反射分量的乘积,即:

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

式中: $I(x, y)$ 为人眼看到的图像; $R(x, y)$ 为反射分量; $L(x, y)$ 为照度分量; $I(x, y)$ 可以看作是照度分量和反射分量的乘积。该算法主要通过数学方法去除图像中的照度分量,得到反射分量。基于此原理,产生了众多图像增强的算法,包括基于随机采样、中心环绕和偏微分方程等变种方法,其中运用最多的是在中心环绕基础上结合高斯低通滤波的单尺度 Retinex 算法^[19](Single Scale Retinex, SSR),该算法使低通滤波充当环绕函数来估计照度分量。

$$L(x, y) = I(x, y) * F(x, y) \quad (2)$$

式中: $F(x, y)$ 为环绕函数(高斯环绕函数)。

$$F(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{(x^2 + y^2)}{2\sigma^2}\right) \quad (3)$$

将式(2)及式(3)带入式(1)可得:

$$\log(R(x, y)) = \log(I(x, y)) - \log(I(x, y) * F(x, y)) \quad (4)$$

因为 SSR 环绕函数中的参数 σ 过于单一,导致颜色失真严重,所以在此基础上又提出了多尺度 Retinex 算法^[20],MSR(Multi scale Retinex, MSR)的核心思想是选择若干个(通常为3个)不同参数 σ 的环绕函数,然后求其加权值。MSR 的反射分量求解公式如下:

$$R_m = \sum_{n=1}^N W_n \{\log(I(x, y)) - \log(I(x, y) * F(x, y))\} \quad (5)$$

式中: N 为环绕函数的个数; W_n 为每个环绕函数对应的权重,并且满足各个权重之和为1且保持权重均等。通常情况下 σ 会选择大、中、小尺度。

1.3 NSST 变换

NSST 算法是在 Shearlet 变换的基础上结合多分辨率和仿射变换而建立的^[21]。NSST 具有多尺度性，可以从多个尺度实现对图像高频细节的保留，在低照度图像增强过程中解决图像细节丢失的问题。

NSST 算法由 2 个部分组成：通过非下采样金字塔 (NSP) 对图像进行剖分；通过剪切波 (SF) 对剖分结果进行多尺度的分解，从而可以实现图像的多尺度的分解，其实现过程见图 1。

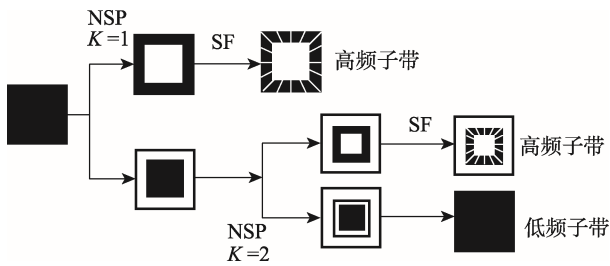


图 1 NSST 分解过程
Fig.1 Decomposition process of NSST

1.4 无参考图像评价指标

常见的图像评价方法分为有参考图像质量评价和无参考图像质量评价。常见的有参考图像质量评价指标有均方误差 (MSE)、峰值信噪比 (PSNR) 等，这些评价指标具有方法简单、计算复杂度低等优点，但一副自然图像的失真类型往往是混合多种失真类型而成的，有参考图像质量评价方法很难反映出图像真实的失真情况。

由于无参考图像质量评价不需要原始图像的任何信息，直接根据增强图像自身特征进行质量评价，并且可以通过混合失真图像评价方法准确地反映图像质量，因此无参考评价方法更具使用价值和广泛的应用场景。为了更好地评价算法效果，文中选取无参考图像质量评价标准对算法处理效果进行评价，其中包括 BIQI^[22]以及 BRISQUE^[23]。

1) BIQI 是对各种混合失真图像质量评价，混合各种失真评价，对图像整体质量的准确描述。其算法思想为两级盲图像质量评价方法，先通过广义高斯分布 (GGD) 对输入图像小波域的子带系数进行拟合，得到均值、方差和形状参数。再利用 SVM 和 SVR 对图像实现模型分类、失真评估并通过概率加权得到最终的评价指标。

$$f_x(x; \mu, \sigma^2, \gamma) = \frac{\beta\gamma}{2 \int_0^{\infty} t^{\gamma-1} e^{-t} dt} \exp \left(- \left[\frac{\frac{1}{e} \sqrt{\int_0^{\infty} t^{\frac{3}{\gamma}-1} e^{-t} dt}}{\int_0^{\infty} t^{\gamma-1} e^{-t} dt} |x - \mu| \right]^{\gamma} \right) \quad (6)$$

式中： γ 为形状参数， σ^2 为方差， μ 为均值， β 为尺度参数。

2) BRISQUE 是基于自然统计特性的质量评价，可以用来判断处理过程对原图像自然属性造成的破坏。其算法思想是从图像中提取平均对比度标准化系数 (Mean Subtracted Contrast Normalized, MSCN)，将 MSCN 系数拟合为非对称性广义高斯分布 (Asymmetric Generalized Gaussian Distribution, AGGD)，提取拟合的高斯分布的特征，输入到支持向量机 SVM 中做回归，从而得到图像质量的评估结果。

MSCN 系数定义见式 (7)

$$\hat{I}(i, j) = \sqrt{\sum_{k=-K}^K \sum_{l=-L}^L w_{k,l} (I_{k,l}(i, j) - \mu(i, j))^2} \quad (7)$$

AGGD 定义见式 (8)

$$f(x, \nu, \sigma_l^2, \sigma_r^2) = \begin{cases} \frac{\nu}{(\beta_l + \beta_r) \Gamma\left(\frac{1}{\beta_l}\right)} e^{\left(\frac{-x}{\beta_l}\right)^{\nu}} & x < 0 \\ \frac{\nu}{(\beta_l + \beta_r) \Gamma\left(\frac{1}{\beta_l}\right)} e^{\left(\frac{-x}{\beta_r}\right)^{\nu}} & x \geq 0 \end{cases} \quad (8)$$

通过上述 2 个无参考图像质量评价指标，可以从图像混合失真程度和图像原始自然信息保留情况 2 个角度对增强后的图像质量进行评测。

2 算法思想

为了降低原始图像亮度过低的影响，提高亮度整体对比度，文中通过 MSR 去除照度分量，降低弱环境光对图像质量的影响。然后对亮度通道进行伽马变换，提高亮度通道整体的对比度。

由于 NSST 具有多尺度的特点，图像经过 NSST 分解之后，每个尺度下的高频分量都含有大量不同的细节信息，但随着分解尺度的增加，会带来运算复杂度增加、高频分量噪声增加等影响，因此有必要对分解参数进行优化，实现最佳分解效果。

由于 NSST 分解的不同尺度含有不同的高频信息，因此经过不同尺度分解得到的增强图像具有不同的图像质量，因此文中选取了平均亮度、平均对比度和信息熵^[24]加权作为用来选择最佳尺度的特征值判定标准。其中平均亮度反映了图像整体的亮度信息，通过 R、G、B 等 3 个通道的灰度信息来确定图像增强后的亮度效果；平均对比度反映了图像的整体质量，通过亮度梯度体现图像在低对比度区域的拉伸效果；信息熵用来表示图像所含信息的多少，但在图像增强方法中，信息熵和图像质量不是正相关的。在高频子带中，除细节信息外还含有大量噪声，这些噪声同样

会使图像信息熵增加。前两者可以综合反映图像质量和人眼视觉感受,后者可以用来去除噪声对图像质量的影响。上述3个特征值的计算公式如下所述。

1) 平均亮度。

$$L_a = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{\sum_{i=0}^2 L_a(i)} \quad i = 0, 1, 2 \quad (9)$$

式中: $L_a(i)$ 为 R, G, B 三通道的平均亮度, 得到图像平均亮度之后, 按照最佳平均亮度 127.5 对其进行归一化处理。

2) 平均对比度。

$$P_a = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{\sum_{i=0}^2 P(i)} \quad i = 0, 1, 2 \quad (10)$$

式中: $P(i)$ 为每个通道的平均对比度。

3) 信息熵。

$$I_a = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{\sum_{i=0}^2 I^2(i)} \quad i = 0, 1, 2 \quad (11)$$

式中: $I(i)$ 为每个通道的信息熵, 单个通道的信息熵通过不同色度的概率密度分布函数的总和计算而得。

综合上述3个特征值, 设定3个特征值的加权公式为:

$$E = 0.4L_a + 0.4P_a - 0.2I_a \quad (12)$$

因为图像的信息熵在成像时既已固定, 加了噪声的图像由于含有噪声信息, 所以增加了原图的信息熵, 而图像增强的过程是优化图像质量的过程, 因此图像信息熵与图像质量并不呈正相关^[24]。考虑到高频系数中含有的噪声问题, 噪声越多, 其对应的彩色图像的信息熵会越高, 并且不同分解尺度所含的噪声信

息是不同的, 因此文中赋值信息熵的权重为负, 由此实现最佳分解尺度的噪声最小化。

3 算法流程

对高对比度 I 进行不同尺度的 NSST 分解后, 得到含有不同高频信息的增强图, 将增强图转换至 RGB 颜色空间后, 根据文中提出的加权特征值 E , 确定最佳分解尺度。见图 2。

4 实验结果与分析

为验证文中算法有效性, 采用 NASA 兰利实验室低照度图像库, 该图库具有不同类型的低照度图像, 并与 JED^[5], LIME^[6], 文献^[7], AAQR^[8] 共 4 种算法进行主观视觉效果和客观评价指标上的对比。文中的运行环境为: Windows10 系统, Matlab 2016b 语言编程环境, Intel i7 处理器, 2.5 GHz, 运行内存 8 GB。

4.1 自适应最佳尺度选择

3 幅图在不同分解尺度下的特征值 E 见图 3, 3 幅图的特征值 E 在不同尺度下是不同的, 这说明不同的分解尺度在图像对比度、整体亮度和细节信息等方面影响着增强图像的效果; 并且图像质量与分解尺度并不呈正相关, 分解尺度越多, 增加运算负担的同时并不能提高图像质量; 由于不同的图像具有不同的图像结构和细节信息, 因此其对应的最佳尺度也是不同的。

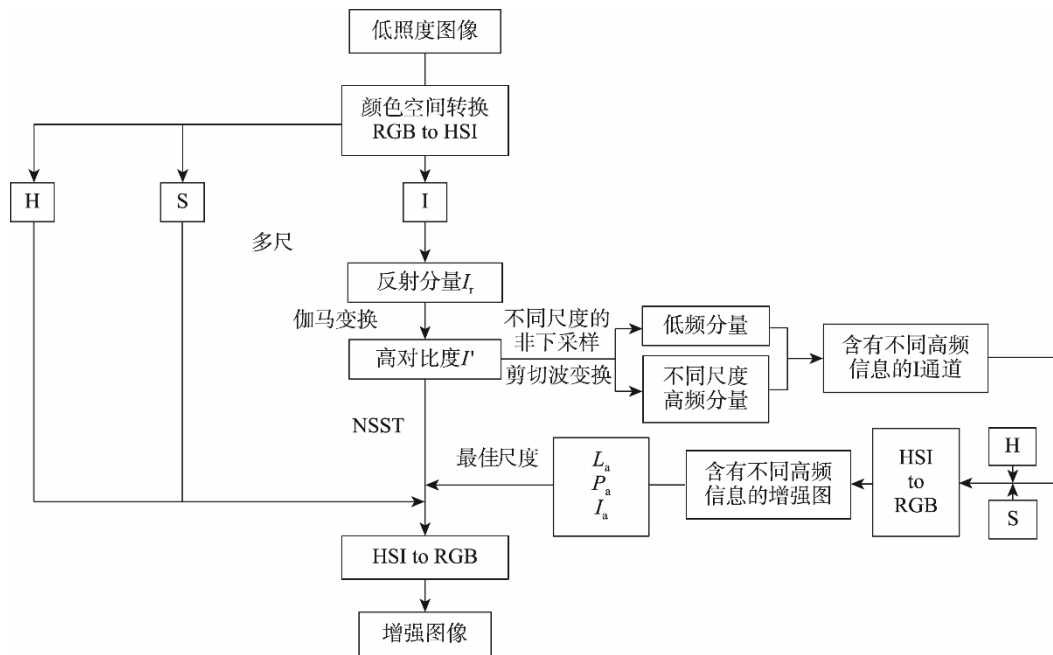


图 2 算法流程

Fig.2 Flowchart of the proposed algorithm

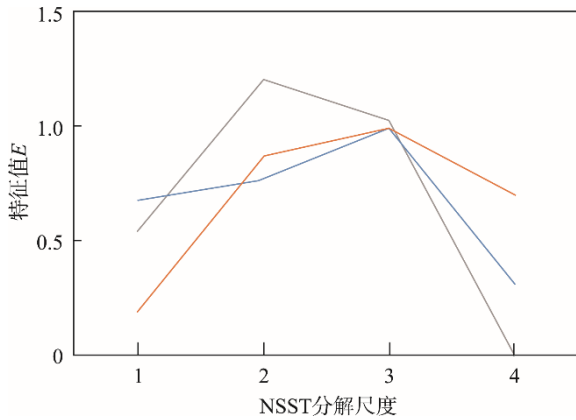


图 3 3 幅图不同尺度的特征值 E
Fig.3 Eigenvalue E in 3 images of different scales

4.2 无参考图像评价结果

为方便分析,使图像质量和得分呈正相关,文中将上述的得分映射到 0—5。其中 BIQI 得分越高,说明算法在增强图像质量过程中所产生的新型失真越少,算法对图像的增强效果越平衡;BRISQUE 得分越高,说明对图像原始自然信息保护越好。按照上述评价指标,以 NASA 兰利实验室低照度图像为样本,得到的客观评价结果的平均值见图 4。

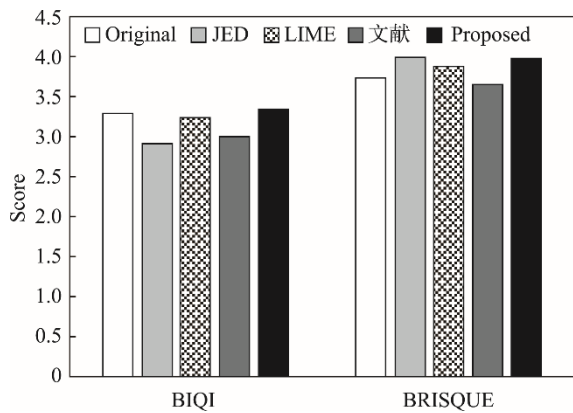


图 4 5 种算法的 BIQI 和 BRISQUE 平均值比较
Fig.4 Comparison of average BIQI and BRISQUE of 5 algorithms

从图 4 无参考客观评价指标可以看出,在 BIQI 得分上,文中提出的算法要优于其他 4 种算法,说明经过文中算法增强后的图像在混合失真的质量评价中表现优异,具有整体出色的图像质量保真能力,最佳尺度的选择,可以确保图像在增强的过程中,不会产生新类型的失真,出色地实现了照度增强的同时维持了图像的质量。在 BRISQUE 得分上,文中提出的算法与 LIME 算法得分相近,相对其他 3 种算法,文中算法得分和原图得分差距最小,这说明在提高图像质量过程中,文中算法对图像自然属性产生破坏最小,即文中对原图像细节部分实现了较好的保护。LIME 算法虽然在 BRISQUE 得分较高,对原图细节保护较好,但在 BIQI 的得分表明该算法在提升质量的同时,产生了新的失真类型,从而使得图像在其他方面产生了较差的影响,详见 4.3 节分析。

4.3 主观评价

为了验证文中算法的有效性,综上所述,图库中选择了一幅具有代表性的图进行对比,见图 5。LIME 算法对原图暗调部分增强效果较好,但对亮调部分增强过度,导致很多细节的丢失,并且该算法对颜色的保真效果不好,在增强过程中有些颜色信息出现了丢失现象;从图 5 可以看出,JED 算法和文献[7]算法对图像的暗调增强效果较好,但使得图像过于平滑,以致在梯度变化的地方丢失了很多细节部分;AAQR 算法实现了图像亮度整体的提升,但颜色保真效果不好,并且颜色信息在某些地方发生了漂移现象。经过文中算法增强后的图像,由于排除了照度分量对图像亮度的影响,因此图像整体亮度有了明显的提高,很多暗处的细节得以显示;由于只对 I 通道进行处理,所以实现了图像增强过程中的颜色保真,图像的颜色信息在增强后的图像中得到充分保护;另外,经过 NSST 多尺度自适应的分解,图像高频信息得以最佳保留,因此在暗调区域和梯度变换部位,图像细节仍然得到很好的保护。



图 5 不同算法处理结果比较及增强细节展示

Fig.5 Comparison of treatment results of different algorithms and display of enhancement details

5 结语

文中提出基于多尺度自适应的 Retinex 低照度图像增强算法,在 HSI 颜色空间下单独对 I 通道进行处理,可以实现对颜色信息的保护。通过 MSR 对 I 通道进行反射分量模拟,降低原始低照度对图像质量的影响。通过 NSST 对 I 通道进行分解,并根据平均亮度、平均对比度、信息熵等 3 个特征值选择最佳分解尺度,从而实现了分解尺度自适应最优化,充分保护了图像高频细节部分。实验证明,分解尺度的选择,影响着增强过程中的细节再现,且尺度与细节再现能力并不呈正相关关系。通过与其他低照度图像增强算法比较,文中提出的算法在主观视觉评价和客观图像质量评价上都具有更佳效果,为后续图像识别及分类奠定了基础。

参考文献:

- [1] ZIMMERMAN J B, PIZER S M, STAAB E V, et al. an Evaluation of the Effectiveness of Adaptive Histogram Equalization for Contrast Enhancement[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 1998, 7(4): 304—312.
- [2] 韩希珍, 赵建. 结合偏微分方程增强图像纹理及对对比度[J]. 光学精密工程, 2012, 20(6): 1382—1388.
HAN Xi-zhen, ZHAO Jian. Enhancement of Image Texture and Contrast Combined with Partial Differential Equation[J]. Optical and Precision Engineering, 2012, 20(6): 1382—1388.
- [3] 范日召, 何斌, 刘燕君, 等. 基于广义线性系统和非锐化掩膜的图像增强算法[J]. 液晶与显示, 2016, 31(10): 973—982.
FAN Ri-zhao, HE Bin, LIU Yan-jun, et al. Image Enhancement Algorithm Based on Generalized Linear System and Unsharp Masking[J]. Liquid Crystals and Displays, 2016, 31(10): 973—982.
- [4] 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 Hong-hai, et al. Review of Image Enhancement Algorithms[J]. Chinese Optics, 2017, 10(4): 438—448.
- [5] REN X, LI M, CHENG W, et al. Joint Enhancement and Denoising Method Via Sequential Decomposition[C]// 2018 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), Florence, 2018: 1—5.
- [6] GUO X, LI Y, LING H. LIME: Low-Light Image Enhancement Via Illumination Map Estimation[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2017, 26(2): 982—993.
- [7] LI M, LIU J, YANG W, et al. Structure-Revealing Low-light Image Enhancement via Robust Retinex Model[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2018, 27(6): 2828—2841.
- [8] SHEN Jian-hao, LI Guo-fa, YAN Wei-quan, et al. Nighttime Driving Safety Improvement via Image Enhancement for Driver Face Detection[J]. IEEE Access, 2018(6): 45625—45634.
- [9] 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 Hong-hai, et al. Review of Image Enhancement Algorithms[J]. Chinese Optics, 2017, 10(4): 438—448.
- [10] 王刚, 肖亮, 贺安之. 脊小波变换域模糊自适应图像增强算法[J]. 光学学报, 2007(7): 1183—1190.
WANG Gang, XIAO Liang, HE An-zhi. Algorithm Research of Adaptive Fuzzy Image Enhancement in Ridgelet Transform Domain[J]. Acta Optica Sinica, 2007(7): 1183—1190.
- [11] ARTHUR L, CUNHA D, ZHOU J, et al. the Nonsampled Contourlet Transform: Theory, Design, and Applications[J]. IEEE Transactions on Image Processing: a Publication of the IEEE Signal Processing Society, 2006, 15(10): 3089—3101.
- [12] JI Xiu-xia, ZHANG Gong. Image Fusion Method of SAR and Infrared Image Based on Curvelet Transform with Adaptive Weighting[J]. Multimedia Tools and Applications, 2017, 76(17): 17633—17649.
- [13] GUO Kang-hui, LABATE D. Optimally Sparse Multidimensional Representation Using Shearlets[J]. SIAM Journal on Mathematical Analysis, 2007, 39(1): 298—318.
- [14] EASLAY G, LABATE D, LIM W Q. Sparse Directional Image Representations Using the Discrete Shearlet Transform[J]. Applied and Computational Harmonic Analysis, 2008, 25(1): 25—46.
- [15] 陶飞翔, 吴一全. 非下采样 Shearlet 变换与参数化对数图像处理相结合的遥感图像增强[J]. 测绘学报, 2015, 44(8): 884—892.
TAO Fei-xiang, WU Yi-quan. Remote Sensing Image Enhancement Based on Non-sampled Shearlet Transform and Parameterized Logarithmic Image Processing Model[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2015, 44(8): 884—892.
- [16] 韩晶, 贾振红, 杨杰, 等. 基于 NSST 域的引导滤波遥感图像增强方法[J]. 计算机工程与设计, 2018, 39(9): 2832—2835.
HAN Jing, JIA Zhen-hong, YANG Jie, et al. Remote Sensing Image Enhancement Based on NSST Domain and Guided Filtering[J]. Computer Engineering and Design, 2018, 39(9): 2832—2835.
- [17] WU F. Low-Light Image Enhancement Algorithm Based on HSI Color Space[C]// 2017 10th International Congress on Image and Signal Processing, Biomedical Engineering and Informatics (CISP-BMEI), Shanghai, 2017: 1—6.

- [18] LAND E H. The Retinex[J]. American Scientist, 1964, 52: 247—264.
- [19] KIMMEL R, ELAD M, SHAKED D, et al. a Variational Framework for Retinex[J]. International Journal of Computer Vision, 2003, 52(1): 7—23.
- [20] RAHMAN Z, JOBSON D J, WOODDELL G A. Multi-scale Retinex for Color Image Enhancement[C]// International Conference on Image Processing, 1996: 1003—1006.
- [21] 荆方, 刘增力. 基于改进的双边滤波与非下采样剪切波变换的图像去噪[J]. 通信技术, 2019, 52(1): 80—85.
JING Fang, LIU Zeng-li. Image Denoising Based on Improved Bilateral Filtering and Non-Subsampled Shearlet Transform[J]. Communication Technology, 2019, 52(1): 80—85.
- [22] MOORTHY A K, BOVIK A C. a Two-Step Framework for Constructing Blind Image Quality Indices[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2010, 17(5): 513—516.
- [23] MITTAL A, MOORTHY A K, BOVIK A C. No-Reference Image Quality Assessment in the Spatial Domain[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2012, 21(12): 4695—4708.
- [24] 王体春. 基于保真性准则的图像智能增强和图像质量评价的理论和方法[D]. 重庆: 重庆医科大学, 2018: 40—45.
WANG Ti-chun. Theory and Method of Image Intelligent Enhancement and Image Quality Evaluation Based on Fidelity Criteria[D]. Chongqing: Chongqing Medical University, 2018: 40—45.