

基于 Retinex 的彩色图像增强方法综述^①



王利娟, 常霞, 张君

(北方民族大学 宁夏智能信息与大数据处理重点实验室, 银川 750021)
(北方民族大学 数学与信息科学学院 图像处理与理解研究所, 银川 750021)
通讯作者: 常霞, E-mail: changxia0104@163.com

摘要: Retinex 算法是彩色图像增强领域中的重要方法, Retinex 算法具有丰富的内涵. 针对传统 Retinex 算法易在增强结果中产生色彩失真、光晕现象等局限性, 本文讨论并分析了现有的基于颜色空间转变、色彩校正和估计照度分量设计方法的一系列相关的改进方法. 最后指出了 Retinex 算法可进一步研究的方向.

关键词: 图像增强; Retinex 算法; 颜色失真; 光晕现象; 色彩校正; 变分法

引用格式: 王利娟, 常霞, 张君. 基于 Retinex 的彩色图像增强方法综述. 计算机系统应用, 2020, 29(6): 13-21. <http://www.c-s-a.org.cn/1003-3254/7430.html>

Survey on Color Image Enhancement Methods Based on Retinex

WANG Li-Juan, CHANG Xia, ZHANG Jun

(Key Laboratory of Intelligent Information and Big Data Processing of Ningxia, North Minzu University, Yinchuan 750021, China)
(Institute of Image Processing and Understanding, School of Math and Information Science, North Minzu University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: Retinex algorithm is an important method in the field of color image enhancement, and it has rich connotation. Aiming at the limitations of traditional Retinex algorithm in color distortion and halo, the paper discusses and analyzes a series of related improved methods based on color space transformation, color correction, and estimated illumination component design. Finally, the further possible research directions of Retinex algorithm are pointed out.

Key words: image enhancement; Retinex algorithm; color distortion; halo phenomenon; color correction; variation method

随着彩色媒介信息的盛行, 彩色图像已经渗透到人们的日常生活中. 为从降质的彩色图像中提取出高质量内容, 图像增强已成为图像处理领域中不可或缺的一部分. 传统的增强方法^[1]通常可分为: 基于空域处理的方法和基于频域处理的方法. 基于空域处理的图像增强方法直接对图像像素进行处理, 如灰度变换、直方图均衡、Retinex 算法; 基于频域的图像增强方法首先将图像看成信号并与基函数做卷积, 再对系数做

变换进行增强, 如基于小波变换和基于多尺度几何变换的增强方法. 本文分析于 20 世纪 70 年代兴起的一种基于物理模型的图像增强算法——Retinex 算法. Retinex 理论是由 Land 等于 1963 年提出的, 该理论依据视网膜成像原理去模拟人类视觉系统 (Human Visual System, HVS)^[2]. 人眼视觉系统在判断图像真实颜色的时候, 几乎不会受到光照的干扰, 即视觉恒常性. Retinex 算法^[3]正是基于视觉恒常这一特性而提出来的. 此算法

① 基金项目: 国家自然科学基金 (11961001); 宁夏自然科学基金 (2018AAC03126); 宁夏高等学校一流学科建设 (数学学科)(NXYLXK2017B09); 北方民族大学重大专项 (ZDZX201801)

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (11961001); Natural Science Foundation of Ningxia (2018AAC03126); Top Level Discipline Construction Project of Ningxia Higher Education (Mathematics) (NXYLXK2017B09); Key Project of North Minzu University (ZDZX201801)

收稿时间: 2019-10-23; 修改时间: 2019-11-20; 采用时间: 2019-12-05; csa 在线出版时间: 2020-06-10

具有色感一致性优点,能保证图像的色彩不受外界不良因素的干扰,故常被用于增强低质量的彩色图像,并取得了令人满意的结果.

1 Retinex 算法的基本思想

假设光照光滑, Retinex 理论通常将待处理图像 z 看成反射图像 m 和照度图像 n 的合成. 其中,反射分量包含图像中大量的本质内容;照度分量则是包含光照等大量的外界信息,决定图像的动态范围. Retinex 算法的核心思想是消除源图像照度分量干扰,依据反射

分量信息还原图像真实色彩. 针对彩色图像,以下公式 $i \in \{R,G,B\}$,不再重复描述. 故 Retinex 算法公式如下:

$$z_i(x,y) = m_i(x,y) \cdot n_i(x,y) \tag{1}$$

其中, (x,y) 为图像某像素的位置坐标. 为节省计算成本,将式 (1) 变换至对数域求解:

$$\log z_i(x,y) = \log m_i(x,y) + \log n_i(x,y) \tag{2}$$

令 $Z = \log z_i(x,y), M = \log m_i(x,y), N = \log n_i(x,y)$. 则有 $M = Z - N$, 将所得结果变换至指数域可得到图像反射分量. 其算法处理过程由图 1 所示.

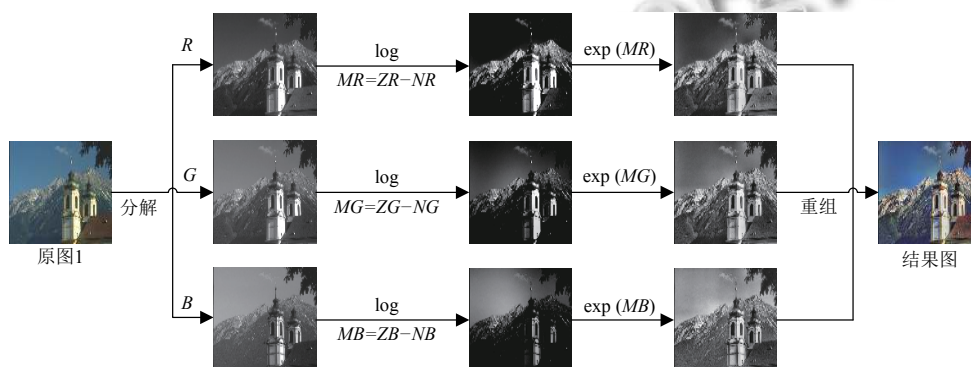


图 1 Retinex 算法处理过程

图 1 中的 $MR, ZR, NR, MG, ZG, NG, MB, ZB, NB$ 分别表示原图 1 的 R, G, B 三通道的 M, Z, N 数值. 明显地,结果图与原图 1 相比,更符合人眼的视觉感知. 无论是细节部分还是颜色方面,均得到了很大的改善,尤其山脊沟壑的细节变化和天空颜色变化,图片整体结构层次分明. 下面先介绍基于路径和基于中心/环绕两种传统 Retinex 算法,并探讨传统的 Retinex 算法的局限性,最后讨论并分析了一系列相关的改进算法.

1.1 基于路径的 Retinex 算法

Retinex 理论发展之初,学者们并未构造出具体的数学模型,而是发现了一种基于路径的计算机制^[4]. 这种计算机制的基本思想是结合路径中的局部最亮点——白色参考点 (White Patch, WP)^[5]来计算路径中相邻像素点的相对亮度来获得反射分量. Land 等正是基于这种路径计算机制而提出了随机路径模型^[2]. 基于路径的 Retinex 模型便是最基础的数学模型. 对于一幅数字图像 z , 设置 N 组随机路径,并给定初始点 k 和目标点 x , 假设某条路径上相邻两像素的亮度值分别为 $S(x_k)$ 和 $S(x_{k+1})$. 则最终多条路径上的目标点 x 处的相对亮度

值可记为:

$$M(x) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \prod_{t_k=1}^{n_k-1} \delta_k \left(\frac{S(x_k)}{S(x_{k+1})} \right) \tag{3}$$

$$\theta_{t_k} = \frac{S(x_k)}{S(x_{k+1})} \tag{4}$$

式中, n_k 表示第 k 条路径像素点总数, δ_k 为阈值函数. 其中 $\delta_k(\theta_{t_k})$ 满足:

$$\delta_k(\theta_{t_k}) = \begin{cases} \theta_{t_k}, & 0 < \theta_{t_k} \leq 1 - \varepsilon \\ 1, & 1 - \varepsilon < \theta_{t_k} \leq 1 + \varepsilon \\ \theta_{t_k}, & 1 + \varepsilon \leq \theta_{t_k} \leq \frac{1 + \varepsilon}{\prod_{m_k=0}^{t_k-1} \delta_k(\theta_{m_k})} \\ \frac{1}{\prod_{m_k=0}^{t_k-1} \delta_k(\theta_{m_k})}, & \theta_{t_k} > \frac{1 + \varepsilon}{\prod_{m_k=0}^{t_k-1} \delta_k(\theta_{m_k})} \end{cases} \tag{5}$$

式中, ε 代表阈值. Provenzi 等在文献^[6]中对该模型进行详细的数学描述,并指出阈值 ε 对结果的影响并不大,甚至可以忽略. 故目标点 x 处的相对亮度值为该位置处亮度值与其他各路径中某位置处的最大亮度值之间的比值. 因此式 (3) 可以被表示为:

$$M(x) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \frac{S(x)}{S(x_{H_k})} \quad (6)$$

式中, x_{H_k} 为最大亮度值所对应的像素点。

随着路径模型应用越来越广泛, 研究者们相继提出许多不同的路径选取方式, 例如: 随机中点位移方法^[7]、双重螺旋方法^[8]、迭代法^[9]和分段路径选取^[10]等方法。但均是一维采样算法, 极易引进噪声、产生伪影。故 Provenzi 等在文献^[11]中提出算法效果更优的二维 RSR (Random Spay Retinex) 模型。随后产生了一些 RSR 的优化算法^[12,13], 用于降低噪声和减少误差。

基于路径的 Retinex 算法能最大程度地提高图像对比度。但因其初始位置、终止位置以及路径选取的不确定性, 极易引入不良噪声, 影响光照估计的精确度; 该算法时间成本较高, 不便在实践中应用。基于路径的 Retinex 算法难以获得色彩保真度高、视觉效果好的高质量图片。

1.2 基于中心/环绕的 Retinex 算法

为获得图像真实色彩, Land 等提出基于中心/环绕的 Retinex 算法。该算法参数个数少, 方便实现。基于中心/环绕的 Retinex 算法的核心思想是用高斯核函数估计照度分量。典型算法有单尺度 Retinex (SSR) 算法^[14]、多尺度 Retinex (MSR) 算法^[15]和带色彩恢复因子的多尺度 Retinex (MSRCR) 算法^[16]。

根据 SSR 算法有:

$$F_{SSR}(x, y) = \log z_i(x, y) - \log[f(x, y) * z_i(x, y)] \quad (7)$$

其中, F_{SSR} 是增强结果, * 表示卷积运算, $f(x, y)$ 表示卷积核函数, 公式如下:

$$f(x, y) = k \cdot \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (8)$$

式中, k 满足 $\iint f(x, y) dx dy = 1$ 。 σ 表示核参数。参数 σ 的取值可决定增强效果, 增大 σ , 图像信息可保留更多, 但颜色保真度会下降; 反之, 减少 σ , 颜色保真度会提升, 但增强图像会丢失许多细节信息。

因 SSR 算法不能同时有效保持细节和颜色信息。故提出 MSR 算法, 该算法的基本思想是将多个高斯核尺度参数加权求和, 其计算公式如下:

$$F_{MSR}(x, y) = \sum_{j=1}^N \omega_j [\log z_i(x, y) - \log(f_j(x, y) * z_i(x, y))] \quad (9)$$

其中, $f_j(x, y)$ 为滤波函数, 尺度和尺度总数分别为 σ_j 和

N , ω_j 是 j 个参数所对应的权重因子, 一般满足 $\sum \omega_j = 1$ 。

为降低色偏, 还原图像真实色彩, Rahman 等提出 MSRCR 算法, 引入了色彩恢复因子^[15], 模型如下:

$$F_{MSRCR} = c_i(x, y) F_{MSR}(x, y) \quad (10)$$

其中, F_{MSRCR} 表示增强结果, $c_i(x, y)$ 表示色彩恢复因子, 公式满足:

$$c_i(x, y) = \mu \cdot \log \left[\eta \cdot \frac{z_i(x, y)}{\sum_i z_i(x, y)} \right] \quad (11)$$

其中, μ 和 η 分别是影响图像色彩恢复的增益因子和偏移量, 均是常数。

1.3 传统 Retinex 算法的局限性

依据传统 Retinex 算法理论获得大量的实验结果, 可分析得出, 该算法在图像增强过程中可以改变照度分量和反射分量在图像中所占的比例, 故图像的对比度提高。照度分量的估计是影响图像增强效果的关键因素。如表 1 所示为传统 Retinex 算法的逻辑思路和优缺点。为更好认识这些算法的性能, 所有实验均在 Matlab 2018a 版本上运行, 且尺度参数根据经验值设定, SSR 算法中 $\sigma = 80$, MSR 算法中选取 $\sigma_1 = 15, \sigma_2 = 80, \sigma_3 = 250$ 。将文献^[8]中的螺旋式路径 Retinex 算法与另外 3 种中心/环绕 Retinex 算法做对比实验, 实验结果在图 2 所示。

从表 1 可知, 虽然传统 Retinex 算法能很大程度改善图像质量, 但在应用过程中仍存在不可忽视的缺点。尤其从图 2 的实验结果中更能进一步认识这些算法的优势与局限性。由图 2(b) 可见文献^[8]算法能提高图 2 的对比度和亮度, 整体颜色较清晰, 但天空部分的颜色并不自然, 并伴随伪影产生。从图 2(c)、图 2(d)、图 2(e) 中明显看出, 基于中心/环绕的 Retinex 算法效果更有效。但算法中参数选取具有局限性, 导致增强图像的对比度、色度、清晰度具有不确定性, 故增强效果并不理想。其中图 2(c) SSR 算法能稍微改善天空的颜色, 但整体对比度有所下降, 且光晕现象较为严重; 图 2(e) 中, MSRCR 算法因有颜色因子的缘故, 颜色明显要比图 2(d) MSR 算法中图像的亮度和色度更为自然真实, 天空部分也少了许多伪影, 但改善效果仍不是最理想。随着学者们对 Retinex 算法的深入研究, 尤其针对传统 Retinex 算法中的颜色失真和光晕现象这两大缺陷, 提出了大量的改进算法。

表1 传统 Retinex 算法的比较

种类	方法分类	逻辑思想	算法优缺点
路径 Retinex 算法	一维路径 二维路径	结合路径中的局部最亮点计算相邻位置的 相对亮度	优点: 降低外界光照不均的干扰, 提高图像对比度 缺点: (1) 算法不够成熟, 尤其只依赖方向的一维路径, 易出现光晕伪影 (2) 需大量调节参数, 算法复杂度高、不便实现
中心环绕 Retinex 算法	SSR/MSR/ MSRCR	目标区域中心场的亮度与扩展场平均亮度 的比率	优点: 参数个数少, 便于实现 缺点: (1) 因滤波器本身局限性, 经验选取参数, 不能很好的平衡平滑效果和保边性能, 时间复杂度仍旧很高. (2) 光晕现象明显, 图像失真不可避免



图2 传统 Retinex 算法实验结果

2 抑制颜色失真的改进策略

在视觉上, 图像的色度会随着照明的变化而变化, 在图像获取过程中, 常因场景限制因素而获得色彩不自然图片. 在对图像实施增强操作时, Retinex 算法中滤波器的设计和权值获取极易导致增强结果出现色偏, 所以抑制颜色失真成为改善图像质量必不可少的环节. 其中对图像进行空间转变处理、色彩校正处理及滤波器参数和权值的自适应选取成为抑制色偏的重要手段.

2.1 颜色空间转变

应用传统的 Retinex 算法增强彩色图像时, 通常先将图像分解成 R、G、B 3 个通道, 再用 Retinex 算法分别处理各个通道, 最后重组得到结果图像. 此处理方法既需要较高的时间成本, 又极易破坏 R、G、B 三者的比例协调, 导致目标图片出现失真现象. 学者们经过不断地探索, 发现可以通过改进颜色空间的转换方法来获得更好的增强结果. 色彩学家 Munseu HA 于 1915 年提出 HSI 颜色空间模型, 其中 H、S、I 3 个特征分别对应图像的色调 (Hue)、饱和度 (Saturation) 和亮度 (Intensity) 信息. 其中 H 和 S 特征包含图像颜色属性, I 特征含有图像的亮度属性. 在对彩色图像进行增强时, 图像的颜色属性保持不变, 并对亮度属性进行 Retinex 算法的处理, 这样可以避免图像颜色属性被破坏, 可减少图像失真. 而且只处理 I 通道可以有效减少运行时间. 王永胜等^[17]基于 Lab 颜色空间对踏面低质

量图像的 L 通道使用 Retinex 算法, 可有效提高踏面图像的清晰度和辨识度, 呈现较为鲜艳的色彩. 张红颖等^[18]在 YUV 色彩空间对夜间图像的明亮度分量 Y 采用 MSR 算法, 并自适应校正色度分量, 使得夜间图像的颜色得以较好的恢复. 常用的还有 HSV、YCbCr、CIE Luv 等颜色空间转变方法.

2.2 色彩校正

色彩校正方法在彩色图像增强时主要针对图像的饱和度和色调进行校正. 文献^[19]提出将主色度因素引入到 MSR 算法进行色彩校正, 该方法基于各颜色通道标准差的局部平均加权来估计输入图像的主色度, 再通过保留图像的色度比来实现色彩再现. 随之研究者们又提出一些新的校正算法^[20-22], 例如局部色调映射、使用伽马校正、引进增益函数、饱和度补偿等. 尤其针对一些低照度图像, 提出了许多颜色校正算法, 如李小霞等^[23]提出 MSR 算法的改进算法, 先对饱和度应用分段对数变换做增强处理, 又采用边缘保持增强了色调, 显著改善了图像的色偏现象; 程芳瑾等^[24]将余弦彩色恢复函数引入到 MSRCR 算法中, 显著地提高了图像的信息熵和色彩丰富度; Hanumantharaju 等^[25]提出了一种新的色彩还原新技术, 并为图像增加了真正的色彩恒定性, 实验结果显示, 该算法为低质图像提供了真实的色彩保真度. 这些算法在改善色偏方面均取得良好效果.

2.3 优化参数设置

对滤波器参数有效选取是减少传统 Retinex 算法引入伪像和色偏的重要因素. 研究者们提出利用智能优化算法对参数进行搜索, 获得最优匹配结果. 汪荣贵等在文献[26]中提出一种基于无限冲激响应 (IIR) 低通滤波的 Retinex 算法, 该算法便是利用实数编码遗传算法自适应获得所需参数, 计算成本明显降低. 并且增强结果图像的边缘得到了很好地保持, 光晕和伪影也不明显; Biswas B 等在文献[27]中提出了一种新的基于布谷鸟搜索合适的参数值来优化 MSR 增强性能, 以增强图像对比度和亮度. 刘彤^[28]将粒子群优化算法引入到 SSR 算法中, 自适应选取不同的滤波模板核参数, 将图像像素分成不同类, 并对应使用不同的滤波模板, 有效地平衡了图像对比度和颜色一致性. 当然, 如果利用图像像素间的关系或者亮度层

关系能够定义合适的权值计算公式^[29,30], 改善色偏效果也是很满意的.

以上讨论的是近几年抑制颜色失真的 3 种改进策略, 这些方法的各有逻辑思路和优缺点, 具体对比如表 2. 为从主观上更直接明了的认识这些改进算法的有效性, 将文献[22,29,30]的实验结果与传统 Retinex 算法做对比实验, 实验结果如图 3 所示.

从图 3 的实验结果中得到, 原图 3 在传统 Retinex 算法处理后花朵的颜色泛白, 属于色彩过增强现象. 经过其他几种增强算法处理后, 效果明显优于图 3(b) MSR 算法. 其中原图 3 经过文献[22]中色调映射算法处理后, 花朵和叶子的色彩明显更加清晰自然; 文献[29]、文献[30]通过自适应选取参数处理后的实验结果中, 整体颜色也更为自然, 尤其文献[29]算法处理后的结果图中叶子的颜色细节有很大改善.

表 2 抑制色彩失真的 3 类算法的比较

种类	逻辑思想	优点	缺点
颜色空间转变	RGB→HSI/HSV/YCbCr/Lab/CIE Luv	减少对图像颜色信息的影响, 很大程度上抑制不自然色彩的出现	颜色空间转变并非绝对, 需结合图像种类灵活使用
色彩校正	利用算子对图像的饱和度和色度进行校正	很大程度丰富图像的颜色信息, 改善颜色失真	因算法种类的灵活性, 实际借鉴中需不断实践比较, 灵活应用
参数选取	利用智能优化算法搜索最优参数使其自适应获得	参数的自适应获取很大程度上改善了图像的颜色一致性	时间成本仍需进一步改善



图 3 抑制色偏的实验对比结果

3 抑制光晕 Retinex 算法

传统 Retinex 算法通常假设光照具有均匀性, 但这与实际情况相悖. 正是这种假设, 使得增强结果易出现“光晕”. 而消除光晕的关键在于光照估计的方法.

3.1 基于滤波器估计照射分量

基于中心/环绕 Retinex 算法均以高斯滤波器作为低通滤波器来估计光照分量. 介于其他一些滤波器也具有独特的优良属性, 甚至比高斯滤波器更优. 例如基于双边滤波 (bilateral filter)^[31,32]的 Retinex 算法、基于引导滤波 (guided filter)^[33,34]的 Retinex 算法、基于三边

滤波器^[35]的 Retinex 算法和基于自适应滤波器^[36,37]的 Retinex 算法也可以估计照射分量. 这些改进均能有效去除光晕. 虽然以上算法在增强细节和消除光晕影响方面取得了很大的进步, 但是算法复杂度会随着滤波核参数的增多而增大, 较为耗时. 故许欣等在文献[38]提出一种快速 Retinex 算法, 使用“mean-shift 滤波器”估计照射分量. Mean-shift 算法能较大程度保护边缘信息, 并且不会破坏图像结构, 相较其他算法能够在节省时间成本的情况下, 有效地抑制光晕, 因此该算法应用最为广泛.

3.2 基于变分法估计照射分量

综上所述,想更有效消除光晕,需滤波器在平滑图像过程中具有良好的边缘保持能力.事实上,滤波器的性能很难做到这一点.学者们从另一个角度出发,提出了基于变分框架的 Retinex 算法,通常被称为 Retinex-like 模型.变分模型通常包括两种,分别是基于 HVS 的变分模型和基于 Horn 物理先验变分模型.

Palma-Amestoy 等是最先提出基于 HVS 的 Retinex-like 变分模型^[39],之后为降低计算成本,Provenzi 等将小波算法引入到变分模型^[40].Kimmel 等^[41]依据先验条件——图像分解为照度图像和反射图像,提出基于 Horn 物理先验变分框架的 Retinex 模型.该算法旨在使光照分量空间分布信息最大程度的平滑,进而有效抑制光晕现象产生.基本思想是根据图像的一些先验信息增加变分约束项,构造目标函数,利用优化原理估计光照分量.与此同时,学者们通过增加或修改约束项相继又提出许多变分模型^[42,43].但这些算法缺乏对反射分量的分段连续性的考虑,随后,李明等引入了全变分 Retinex 算法 (TV-Retinex)^[44],该方法有效地显示出被覆盖阴影区域的细节信息,其中的 Bregman 迭代算法能有效加快 TV 模型算法速度.但是该算法并未考虑保真项,Wang 等^[45]在后来的研究中添加了保真项这一因素,算法获得了更好的视觉效果.这就表示普通的变分项不能很好的保持图像信息,照度估计效果不是很理想.学者们对变分项不断地进行灵活的改进.例如,在变分项中增加权重^[46],增加结构性约束^[47],增强效果

明显得到很大提升.之后为抑制噪声和伪影产生的不良影响,文献^[48]将指导矢量场项引入到变分框架模型中,提出一种新的基于全局稀疏梯度引导变分 (GSG-VR) 的图像增强技术,可以有效去除光晕,恢复真实色彩.

以上所分析讨论的可以抑制“光晕现象”的两类改进策略,同时也对这两类改进策略的逻辑思路和优缺点进行归纳总结,具体对比如表 3 所示.同样地,针对这两种改进策略各选取一种典型代表算法进行对比实验,实验结果如图 4 所示.

由图 4 所示,原图 4 经过传统 Retinex 算法处理后,如图 4(b) 和图 4(c) 所显示,光晕现象较为明显,尤其法和文献^[41]中利用变分法处理后的实验结果显示,原图 4 中无论是整体的亮度还是颜色都非常符合视天空的颜色变化最为明显,细节信息丢失严重.而原图 4 经过文献^[34]中利用导向滤波估计照度分量算觉感知.尤其天空颜色得到了很明显的恢复,很大程度降低了光晕现象的产生.

表 3 抑制光晕的两类算法的比较

种类	逻辑思想	优点	缺点
滤波器选取	结合图像种类,根据滤波器性能使其平滑和保边效果最稳定	很大程度降低因滤波器的不当选择造成的光晕现象	算法复杂度较高
变分 Retinex 算法	光照估计问题转化为优化问题	弥补滤波器本身局限性,很大程度提高了光照估计的精确性	算法太灵活,难以构造满意的目标函数,导致算法复杂度高



图 4 抑制光晕的实验对比结果

4 其他的 Retinex 改进方法

Retinex 算法对于动态范围低、曝光不足、有雾、水下等低质彩色图像,均能取得良好效果.随着科学技术不断更新发展,为快速增强更多错综复杂的低质图像,学者们提出一系列其他算法,如 Hore 提出基于偏微分方程 (PDE) 的 Retinex 算法^[49],认为物体反射率在图像的尖锐变化处,其他部分是光滑的,并利用拉

普拉斯变换和阈值函数将 Retinex 求解过程形式化为离散泊松方程.该算法以一种独特的视角简化了的 Retinex 算法,参数个数少,结果也较为稳定.文献^[50,51]均对高斯模板进行了优化,以提高卷积速度.其他方面还有 Retinex 基于核函数实现^[52]、基于迭代有理滤波器方法^[53]、基于恰可分辨率差异的非线性滤波方法^[54]、基于立体视觉的 Retinex 方法^[55]等.这些方法均在改

进 Retinex 算法方面做出了重要贡献, 适应于许多低质种类图像的增强, 对于改善视觉效果具有重要意义。

5 总结与展望

本文针对传统 Retinex 算法中出现的颜色失真和光晕现象问题, 分析了一系列改进算法. 并对不同算法种类的核心思想和优缺点进行归纳总结。

目前常用基于路径、基于中心/环绕、基于偏微分和基于变分这 4 种 Retinex 算法. 对于色彩恢复和去除光晕的改进算法都做出了很大的贡献, 尤其中心/环绕 Retinex 算法因其结果稳定性强, 使用较广泛. 但其中的路径法参数多、噪声大; 变分法太灵活, 难以构造满意的目标函数. 所以 Retinex 算法面临的主要挑战仍是在构造模型、优化模型时, 如何降低算法计算复杂度, 进而节省时间成本. 针对图像失真问题, 仍然需要进一步寻找更加精准的颜色恢复方法, 使其既符合人眼的视觉感知, 在实际生活中又符合人类的经验认知。

参考文献

- 冈萨雷斯, 伍兹. 数字图像处理. 阮秋琪, 阮宇智, 译. 3 版. 北京: 电子工业出版社, 2011.
- Land EH. The Retinex theory of color vision. *Scientific American*, 1977, 237(6): 108–128. [doi: 10.1038/scientificamerican1277-108]
- Land EH, McCann JJ. Lightness and Retinex theory. *Journal of the Optical Society of America*, 1971, 61(1): 1–11. [doi: 10.1364/JOSA.61.000001]
- Brainard DH, Wandell BA. Analysis of the Retinex theory of color vision. *Journal of the Optical Society of America A*, 1986, 3(10): 1651–1661. [doi: 10.1364/JOSAA.3.001651]
- Rizzi A, Gatta C, Marini D. A new algorithm for unsupervised global and local color correction. *Pattern Recognition Letters*, 2003, 24(11): 1663–1677. [doi: 10.1016/S0167-8655(02)00323-9]
- Provenzi E, de Carli L, Rizzi A, et al. Mathematical definition and analysis of the Retinex algorithm. *Journal of the Optical Society of America A*, 2006, 22(12): 2613–2621.
- Marini D, Rizzi A. A computational approach to color adaptation effects. *Image and Vision Computing*, 2000, 18(13): 1005–1014. [doi: 10.1016/S0262-8856(00)00037-8]
- Cooper TJ, Baqai FA. Analysis and extensions of the Frankle-McCann Retinex algorithm. *Journal of Electronic Imaging*, 2004, 13(1): 85–92. [doi: 10.1117/1.1636182]
- Funt BV, Ciurea F, McCann JJ. Retinex in MATLAB. *Journal of Electronic Imaging*, 2004, 13(1): 112–121.
- Frankle JA, McCann JJ. Method and apparatus for lightness imaging: US, 4384336. [1983-05-17].
- Provenzi E, Fierro M, Rizzi A, et al. Random spray Retinex: A new Retinex implementation to investigate the local properties of the model. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2007, 16(1): 162–171. [doi: 10.1109/TIP.2006.884946]
- Banić N, Lončarić S. Light random sprays Retinex: Exploiting the noisy illumination estimation. *IEEE Signal Processing Letters*, 2013, 20(12): 1240–1243. [doi: 10.1109/LSP.2013.2285960]
- Lecca M, Rizzi A. Tuning the locality of filtering with a spatially weighted implementation of random spray Retinex. *Journal of the Optical Society of America A*, 2015, 32(10): 1876–1887. [doi: 10.1364/JOSAA.32.001876]
- Jobson DJ, Rahman Z, Woodell GA. Properties and performance of a center/surround Retinex. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1997, 6(3): 451–462. [doi: 10.1109/83.557356]
- Rahman ZU, Jobson DJ, Woodell GA. Multi-scale Retinex for color image enhancement. *Proceedings of 3rd IEEE International Conference on Image Processing*. Lausanne, Switzerland. 1996. 1003–1006.
- Rahman ZU, Jobson DJ, Woodell GA. Retinex processing for automatic image enhancement. *Proceedings of SPIE—The International Society for Optical Engineering*, 2004, 13: 100–110.
- 王永胜, 宋子彬, 校美玲, 等. Lab 色彩空间的 Retinex 轮对踏面图像增强算法. *石家庄铁道大学学报 (自然科学版)*, 2019, 32(1): 48–55.
- 张红颖, 袁晓鹏. 基于 YUV 色彩空间的 Retinex 夜间图像增强算法. *科学技术与工程*, 2014, 14(30): 71–75. [doi: 10.3969/j.issn.1671-1815.2014.30.014]
- Jobson DJ, Rahman Z, Woodell GA. A multiscale Retinex for bridging the gap between color images and the human observation of scenes. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1997, 6(7): 965–976. [doi: 10.1109/83.597272]
- 陈亮, 林增. 基于 gamma 校正的多尺度 Retinex 的预处理算法研究. *武夷学院学报*, 2018, 37(9): 68–74.
- 薛鸿民. 基于饱和度的多尺度雾天降质图像质量增强算法. *科学技术与工程*, 2017, 17(29): 108–113. [doi: 10.3969/j.issn.1671-1815.2017.29.015]
- Ahn H, Keum B, Kim D, et al. Adaptive local tone mapping

- based on Retinex for high dynamic range images. Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Consumer Electronics. Las Vegas, NV, USA. 2013. 153–156.
- 23 李小霞, 李铖果, 邹建华, 等. 一种新的低照度彩色图像增强算法. 计算机应用研究, 2011, 28(9): 3554–3555, 3558. [doi: [10.3969/j.issn.1001-3695.2011.09.100](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-3695.2011.09.100)]
- 24 程芳瑾, 杜晓骏, 马丽, 等. 基于 Retinex 的低照度图像增强. 电视技术, 2013, 37(15): 4–6, 10.
- 25 Hanumantharaju MC, Ravishankar M, Rameshbabu DR, *et al.* Color image enhancement using Multiscale Retinex with modified color restoration technique. Proceedings of the 2011 Second International Conference on Emerging Applications of Information Technology. Kolkata, India. 2011. 93–97.
- 26 汪荣贵, 张璇, 张新龙, 等. 一种新型自适应 Retinex 图像增强方法研究. 电子学报, 2010, 38(12): 2933–2936.
- 27 Biswas B, Roy P, Choudhuri R, *et al.* Microscopic image contrast and brightness enhancement using multi-scale Retinex and cuckoo search algorithm. Procedia Computer Science, 2015, 70: 348–354. [doi: [10.1016/j.procs.2015.10.031](https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.10.031)]
- 28 刘彤. 基于粒子群优化的 Retinex 图像增强[硕士学位论文]. 重庆: 重庆师范大学, 2016.
- 29 李勇. 基于 Retinex 理论的低照度图像增强算法研究与实现[硕士学位论文]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
- 30 李毅, 张云峰, 年轮, 等. 尺度变化的 Retinex 红外图像增强. 液晶与显示, 2016, 31(1): 104–111.
- 31 Elad M. Retinex by two bilateral filters. Proceedings of the 5th International Conference on Scale-Space Theories in Computer Vision. Hofgeismar, Germany. 2005. 217–229.
- 32 Durand F, Dorsey J. Fast bilateral filtering for the display of high-dynamic-range images. ACM Transactions on Graphics, 2002, 21(3): 257–266. [doi: [10.1145/566654.566574](https://doi.org/10.1145/566654.566574)]
- 33 Wang YF, Wang HY, Yin CL, *et al.* Biologically inspired image enhancement based on Retinex. Neurocomputing, 2016, 177: 373–384. [doi: [10.1016/j.neucom.2015.10.124](https://doi.org/10.1016/j.neucom.2015.10.124)]
- 34 Yin JC, Li HB, Du JP, *et al.* Low illumination image Retinex enhancement algorithm based on Guided filtering. Proceedings of the 2014 IEEE 3rd International Conference on Cloud Computing and Intelligence Systems. Shenzhen, China. 2014. 639–644.
- 35 Choudhury P, Tumblin J. The trilateral filter for high contrast images and meshes. Proceedings of SIGGRAPH '05: ACM SIGGRAPH 2005 Courses. New York, NY, USA. 2005. 5-es.
- 36 Ding XH, Wang XX, Xiao Q. Color image enhancement with a human visual system based adaptive filter. Proceedings of 2010 International Conference on Image Analysis and Signal Processing. Xiamen, China. 2010. 79–82.
- 37 Meylan L, Susstrunk S. High dynamic range image rendering with a Retinex-based adaptive filter. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(9): 2820–2830. [doi: [10.1109/TIP.2006.877312](https://doi.org/10.1109/TIP.2006.877312)]
- 38 许欣, 陈强, 王平安, 等. 消除光晕现象的快速 Retinex 图像增强. 计算机辅助设计与图形学学报, 2008, 20(10): 1325–1331.
- 39 Palma-Amestoy R, Provenzi E, Bertalmio M, *et al.* A perceptually inspired variational framework for color enhancement. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2009, 31(3): 458–474. [doi: [10.1109/TPAMI.2008.86](https://doi.org/10.1109/TPAMI.2008.86)]
- 40 Provenzi E, Caselles V. A wavelet perspective on variational perceptually-inspired color enhancement. International Journal of Computer Vision, 2014, 106(2): 153–171. [doi: [10.1007/s11263-013-0651-y](https://doi.org/10.1007/s11263-013-0651-y)]
- 41 Kimmel R, Elad M, Shaked D, *et al.* A variational framework for Retinex. International Journal of Computer Vision, 2003, 52(1): 7–23. [doi: [10.1023/A:1022314423998](https://doi.org/10.1023/A:1022314423998)]
- 42 Ma WY, Osher S. A TV Bregman iterative model of Retinex theory. Inverse Problems and Imaging, 2017, 6(4): 697–708.
- 43 Chen T, Yin WT, Zhou XS, *et al.* Total variation models for variable lighting face recognition. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2006, 28(9): 1519–1524. [doi: [10.1109/TPAMI.2006.195](https://doi.org/10.1109/TPAMI.2006.195)]
- 44 李明, 杨艳屏. TV-Retinex: 一种快速图像增强算法. 计算机辅助设计与图形学学报, 2010, 22(10): 1777–1782.
- 45 Ng MK, Wang W. A total variation model for Retinex. SIAM Journal on Imaging Sciences, 2011, 4(1): 345–365. [doi: [10.1137/100806588](https://doi.org/10.1137/100806588)]
- 46 Fu XY, Zeng DL, Huang Y, *et al.* A weighted variational model for simultaneous reflectance and illumination estimation. Proceedings of 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Las Vegas, NV, USA. 2016. 2782–2790.
- 47 Guo XJ, Li Y, Ling HB. LIME: Low-light image enhancement via illumination map estimation. IEEE Transactions on Image Processing, 2017, 26(2): 982–993. [doi: [10.1109/TIP.2016.2639450](https://doi.org/10.1109/TIP.2016.2639450)]
- 48 Zhang R, Feng XC, Yang LX, *et al.* Global sparse gradient guided variational Retinex model for image enhancement.

- Signal Processing: Image Communication, 2017, 58: 270–281. [doi: [10.1016/j.image.2017.08.008](https://doi.org/10.1016/j.image.2017.08.008)]
- 49 Horn BKP. Determining lightness from an image. Computer Graphics and Image Processing, 1974, 3(4): 277–299. [doi: [10.1016/0146-664X\(74\)90022-7](https://doi.org/10.1016/0146-664X(74)90022-7)]
- 50 Wang W, Li B, Zheng J, *et al.* A fast multi-scale Retinex algorithm for color image enhancement. Proceedings of 2008 International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition. Hong Kong, China. 2008. 80–85.
- 51 Jang CY, Lim JH, Kim YH. A fast multi-scale Retinex algorithm using dominant SSR in weights selection. Proceedings of 2012 International SoC Design Conference. Jeju Island, Republic of South Korea. 2012. 37–40.
- 52 Bertalmío M, Caselles V, Provenzi E. Issues about Retinex theory and contrast enhancement. International Journal of Computer Vision, 2009, 83(1): 101–119. [doi: [10.1007/s11263-009-0221-5](https://doi.org/10.1007/s11263-009-0221-5)]
- 53 Marsi S, Impoco G, Ukovich A, *et al.* Using a recursive rational filter to enhance color images. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2008, 57(6): 1230–1236. [doi: [10.1109/TIM.2007.915141](https://doi.org/10.1109/TIM.2007.915141)]
- 54 Choi DH, Jang IH, Kim MH, *et al.* Color image enhancement based on single-scale Retinex with a JND-based nonlinear filter. Proceedings of 2007 IEEE International Symposium on Circuits and Systems. New Orleans, LA, USA. 2007. 3948–3951.
- 55 Xiong WH, Funt B. Stereo Retinex. Image and Vision Computing, 2009, 27(1–2): 178–188. [doi: [10.1016/j.imavis.2007.11.012](https://doi.org/10.1016/j.imavis.2007.11.012)]