

文章编号: 1001 - 2486(2011)03 - 0083 - 06

基于分片光滑照度估计的 Retinex 图像处理框架^{*}

吴壮志, 齐立娜, 骆 沛

(北京航空航天大学 计算机学院, 北京 100191)

摘要: Retinex 理论是一种图像增强技术, 其基本原理是将原图像分解为照度图像和反射图像的乘积。传统的 Retinex 理论假定照度图像是平滑的, 在实际场景中, 由于目标的反射特征不同及阴影等的影响, 照度图像实际上是分片平滑的, 导致反射图像边界附近模糊, 产生光晕现象。针对上述问题, 提出了一种改进的 Retinex 理论图像处理框架: 采用分片平滑算子估算照度图像, 消除了光晕现象; 引入照度校正功能, 调节图像的对比度; 引入反射校正功能, 进行细节增强和去噪。结合图像质量评价指标, 对改进后框架的有效性和正确性进行了分析验证, 实验结果表明改进后的方法效果良好。

关键词: Retinex; 双边滤波; Gamma 校正; 图像质量评价

中图分类号: TP391.4 文献标识码: A

A Retinex Image Processing Framework Based on Estimation of Piecewise Smooth Illumination

WU Zhuang-zhi, QI Li-na, LUO Pei

(School of Computer Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Retinex theory is a kind of technology for image enhancement, and its basic principle is to decompose the original image into the product of illumination and reflectance. Traditional Retinex theory generally assumes that illumination is smooth, while in actual scenes, because of effects of different reflection characteristics of targets and shadings, illumination is piecewise smooth, resulting in an edge blurred reflection image and generating halos. For the above problems, this paper proposes an improved image processing framework for Retinex theory. First, the illumination is estimated with piecewise smooth operator to eliminate the halo phenomenon. Second, illumination correction is introduced for adjusting the contrast of the image. Third, reflection correction is introduced for detail enhancement or denoising. In the end, this paper verifies the improved framework with image quality evaluating indicators for the validity and correctness. The experimental results show that the improved framework is effective.

Key words: Retinex; bilateral filtering; gamma correction; image quality assessment

Retinex 理论是 E. Land 在 1963 年提出的一种颜色恒常知觉的计算理论。该理论认为, 人类视觉感知到的物体颜色主要由物体固有的反射性质引起的颜色变化决定, 而与环境光照引起的颜色变化关系不大。后者通常表现为平滑的照明梯度, 而前者则表现为突变形式。通过分辨这两种变化形式, 人类视觉系统就能将图像的照度变化和本质变化做出区分, 使得对物体表色的知觉保持相对恒常。

在 Retinex 理论的发展过程中, 先后出现了许多种基于 Retinex 理论的图像处理方法。比较典型的有同态滤波 Retinex 方法^[1]、泊松方程 Retinex 算法^[1-2]、非线性滤波 Retinex 方法^[3], 以及随后发

展的单尺度 Retinex^[4]、多尺度 Retinex^[4-5] 和基于可变框架的 Retinex 算法^[1,6]。上述算法都没能很好地解决如下两个问题: 一是在估计图像中高对比度边缘区域的照度时, 会出现较大的误差, 导致结果图像中出现光晕现象; 二是原始的低照度图像中普遍包含较多的噪声, 通过增强算法处理后, 这些噪声也同时被放大, 影响图像的最终质量。

针对上述两个问题, 本文提出了一种基于分片平滑照度估计的 Retinex 图像处理框架, 利用分片光滑算子代替传统框架中的高斯卷积估计输入图像的照度, 同时引入照度校正和反射校正功能, 对分离得到的照度图像和反射图像做后续处理。最后采用客观评价为主, 主观评价为辅的方式, 对

^{*} 收稿日期: 2010 - 12 - 09

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目(2008BAH29B02)

作者简介: 吴壮志(1969—), 男, 副教授, 博士。

本文的实验结果进行分析验证。

1 Retinex 理论

1.1 算法框架

根据 Retinex 理论,一幅图像可以看成是照度图像和反射图像的乘积,如式(1)所示。反射图像 R 决定了一幅图像的本质属性,照度图像 L 决定了一幅图像能达到的动态范围,Retinex 理论的目的就是从原始图像 S 中获得图像的本质属性,从而避免照度的影响,达到颜色恒常。

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

将式(1)放在对数域处理,得到式(2),其中 $r = \log R, s = \log S, l = \log L$ 。在对数域处理有两个好处:第一,对数形式接近人眼亮度感知能力;第二,可以将复杂的乘积形式变成简单的加减。

$$r = s - l \quad (2)$$

传统的 Retinex 算法框架如图 1 所示,计算流程如下:

(1)将输入图像 S 取对数,变换到对数域得 s ;

- (2)在对数域中,将 s 和高斯核函数进行卷积得到对数域的照度估计图像 l ;
- (3)计算 $r = s - l$,得到对数域的反射图像;
- (4)对 r 求指数得到反射图像。

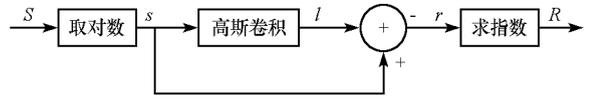


图 1 传统 Retinex 算法处理框架
Fig.1 The basic framework of Retinex algorithms

1.2 传统 Retinex 处理框架存在的问题

图 1 所示框架存在以下两个问题:

- (1)不具备光晕消除能力。传统 Retinex 理论利用高斯卷积模板进行照度估计,不具备边界保留能力,导致图像像素值变化剧烈的边界区域反射图像会产生光晕现象,如图 2 所示。图 2(a)中的一维信号与上面图像中的黑色横线相对应,表示横线上的图像灰度值。比较图 2(c)中的上、下两图可以看出,光晕现象一般产生于像素值变化比较剧烈的边缘。

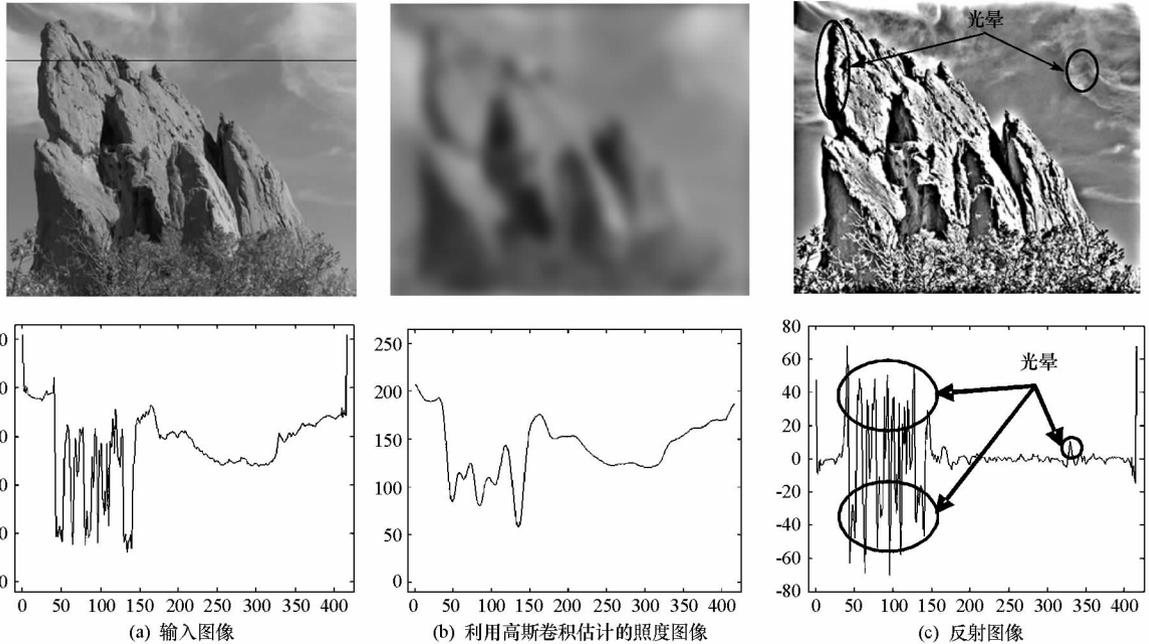


图 2 光晕现象说明
Fig.2 Explanation of halos

(2)照度和反射图像校正能力差。由于照度估计不准确,导致照度和反射图像并不是原图像的正交分解,反射图像中混入了部分照度信息,同时也有部分反射信息混入照度图像中。这不仅导致反射图像产生光晕现象,同时影响了对照度图像和反射图像的进一步处理。照度图像表示了原图像中的直流低频部分,代表了原图像所能达到的动态范围,当照度图像估计不准确时,如果对其

进行对比度拉伸等操作,必然导致误差放大。反射图像代表了图像的高频成分,如果混入了直流低频分量,对反射图像进行增强等处理时可能会导致局部区域过饱和,产生光晕现象。

2 改进的 Retinex 图像处理框架

本文提出了一种基于分片光滑照度估计的 Retinex 图像处理框架。改进的核心内容是:采用

分片光滑算子来估计照度图像,避免了传统框架中高斯卷积产生的边界模糊问题,使得估计的照度图像更逼近于图像真实的照度,从而也使得反射图像更加准确,这样既消除了光晕现象,也为反射图像的进一步处理提供了质量保证。同时引入照度校正和反射校正功能,使框架更加完备,既能

对照度图像的动态表示能力进行调整,又提供了对反射图像的加工处理能力,如边缘锐化、细节增强和去噪等。最后,为了真实表现一幅图像,将校正后的照度图像和反射图像作积,得到最终的输出图像。改进后的 Retinex 算法处理框架如图 3 所示。

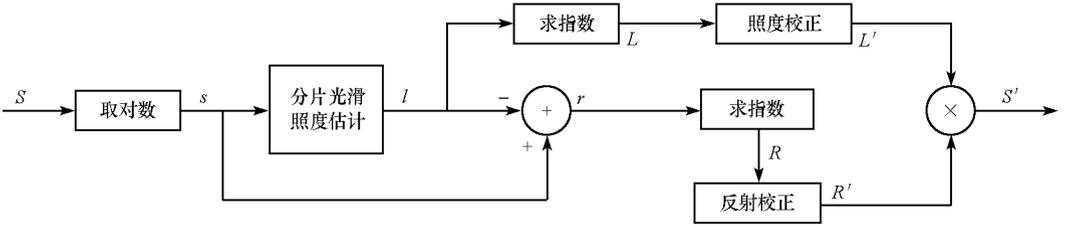


图 3 改进的 Retinex 算法框架
Fig.3 The modified framework of Retinex algorithms

2.1 分片光滑的照度估计

所谓分片光滑是指该类算子作用于图像时,将图像描述为一个分片光滑模型,即将边缘作为区域的边界,假定区域内像素的灰度值为不间断的连续函数,它在鼓励区域内平滑的同时禁止区域间平滑,使滤波器在平滑噪声的同时能较好地保留边缘等重要特征。常见的分片光滑算子有:双边滤波^[7]、各向异性扩散^[8]、全变分^[9]、NL-Means^[10]和 l_1 优化^[11]等。

本文采用双边滤波来估计图像照度。双边滤波是一种边界保留的信号平滑技术,它在估计照度时综合考虑了图像像素值本身和周围像素位置远近的差异,有效避免了高对比度边缘附近高低像素的相互影响,从而消除光晕现象。以 L_p 表示 p 点的照度像素值, S_p 表示 p 点的原始图像像素值,利用双边滤波估计的照度图像公式为

$$L_p = \frac{1}{W_p} \sum_{q \in \Omega} G_{\sigma_s}(\|p - q\|) G_{\sigma_r}(S_p - S_q) S_q \quad (3)$$

其中 $W_p = \sum_{q \in \Omega} G_{\sigma_s}(\|p - q\|) G_{\sigma_r}(S_p - S_q)$ 表示归一化因子; G_{σ_s} 和 G_{σ_r} 都是高斯函数,用于计算 p 点空域和值域的权值贡献,参数 σ_s 和 σ_r 分别表示其高斯核的宽度; Ω 表示所有像素值的集合。从式(3)可以看出,只有与 p 满足空间相近并且灰度值相近的像素才会参与像素 p 的加权平均。

2.2 照度校正

照度图像表示了原始图像像素值的动态范围,对其进行校正时应考虑采用直方图校正、Gamma 校正^[12]等对比度校正方法。对 HDR(High

Dynamic Range)图像,其动态范围大,为了在标准显示设备上显示,需要对其照度图像进行压缩。反之,对 LDR(Low Dynamic Range)图像,则需要对其照度图像进行拉伸来增强对比度。

2.3 反射校正

反射图像包含图像的细节信息,反射校正主要是指对反射图像进行细节增强,如式(4)所示, R 和 R' 分别表示增强前后的反射图像, α 表示增强倍数。当 $\alpha > 1$ 时,表示细节放大;当 $\alpha < 1$ 时,表示细节压缩。如果 α 过大或过小,可能使图像的像素值超出显示设备的表示范围,从而造成细节丢失。

$$R' = \alpha \cdot R \quad (4)$$

2.4 线性拉伸和截断拉伸

由于图 3 中图像 L' 、 R' 或 S' 的像素值的动态范围一般不符合标准打印和显示设备的要求,往往还需要进行线性拉伸或截断拉伸等^[13]后续处理。

以图 4 为例来说明本文改进的分解框架与传统分解框架的比较结果。原始图像见图 5(a),图 4 中(a)列和(b)列分别表示由输入图像分解得到的照度图像和反射图像。其中第一行为传统 Retinex 框架中利用高斯卷积估计照度后的分解效果,第二行为本文框架中采用分片光滑算子(双边滤波)计算照度图像的分解效果。(c)列为对(a)列中照度图像进行 Gamma 校正后的效果。可以看出,与高斯卷积相比,由双边滤波计算得到的照度图像是分片光滑的,参见图 4(a)中的方形框所示的区域。

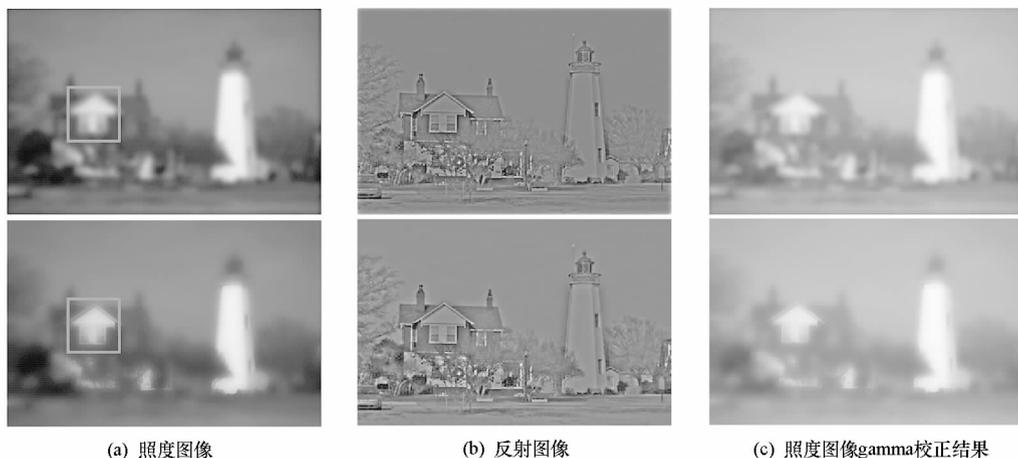


图4 高斯卷积(上)和双边滤波(下)图像分解比较
Fig.4 Comparison between gaussian operator and bilateral filter

3 实验结果与分析

以图 5(a)和图 6(a)两幅图像为例进行实验,对传统 Retinex 框架和本文框架进行了比较。为了达到更好的视觉效果,在处理过程中都对照度图像进行了 Gamma 校正,并对结果图像进行了线性或者截断拉伸以在显示设备上正常显示。本文框架在计算照度图像时选用了双边滤波作为分片光滑算子。同时为了进一步说明本框架与传统框架(采用高斯卷积计算照度图像)以及其它的图像增强方法的优越性,结合图像评价指标对实验结果进行了分析。

3.1 实验结果

图 5(a)取自 NASA,主要比较传统框架与本

文框架的区别,以及对结果图像进行不同的拉伸处理得到的图像效果。(a)表示原始图像,(b)表示图(a)的直方图均衡化结果,(c)表示传统框架得到的最终图像,(d)、(e)和(f)为本文框架得到的效果,其中(d)和(e)分别表示对输出采用线性拉伸和截断拉伸的结果,(f)为对(e)中反射图像进行细节增强后的最终输出效果($\alpha = 1.1$)。

通过图 5 可以看出,传统框架采用高斯卷积估计照度图像,使得输出图像的边界信息发生模糊,如图 5(c)中方形框区域所标示的树梢部分,而分片光滑算子则使得边界更清晰,同时对结果的截断拉伸操作也使得图像的视觉质量有进一步的提高。



图5 算法效果图(一)
Fig.5 Demo of this algorithm (1)

图 6(a)为 HDR 图像,取自 MATLAB 图像库。图 6 主要说明了本框架处理 HDR 图像对原框架的改进,以及对反射图像进行细节增强后的图像质量提高的效果。(a)表示原始图像,(b)为传统

框架的处理结果,(c)和(d)为采用双边滤波器估计照度图像得到的结果图像,两者均采用截断拉伸,(d)为对(c)中反射图像进行细节增强的效果($\alpha = 1.2$)。

从图 6 可以看出,本文提出的框架在处理 HDR 图像时也明显优于原框架,同时对反射图像

的细节增强,也大大提高了图像的视觉效果。

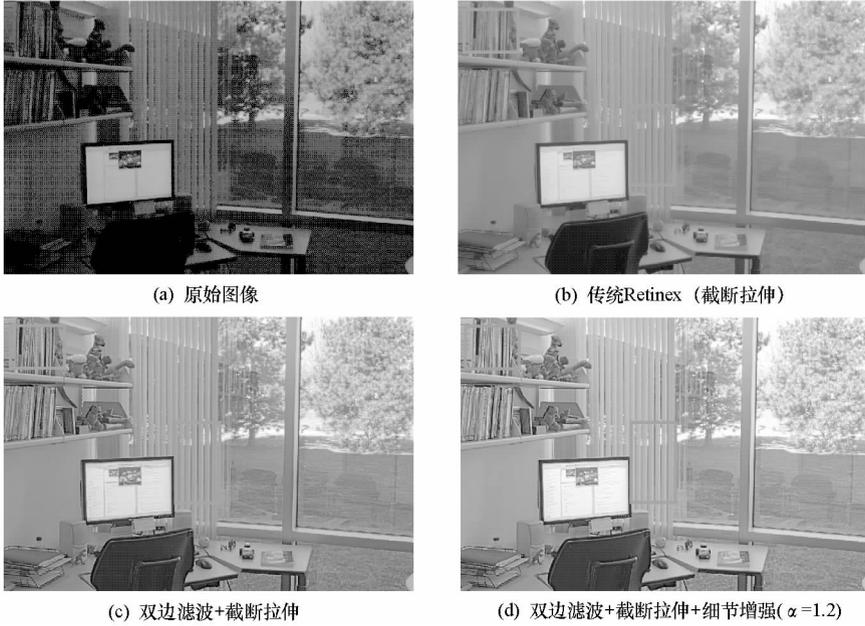


图 6 算法效果图(二)
Fig.6 Demo of this algorithm (2)

从图像处理后的效果可以看出,虽然直方图均衡化方法使图像较暗区域的可见性与分辨率有所提高,但却以牺牲较亮区域的视觉对比度为代价,并且经直方图均衡化后图像出现彩色失真。与传统的 Retinex 框架相比,本文提出的 Retinex 框架的图像处理效果更为理想,不仅使图像的整体对比度有所改善,而且使图像的清晰度也大大提高。

3.2 结果分析

为了进一步比较各方法的优劣性,实验完成后,结合方差、平均梯度、信息熵等参数进行分析^[14]。

方差反应了图像的整体灰度分布,方差越大,对比度越大;方差越小,则对比度也越小,其表达式为

$$\sigma^2 = \frac{1}{3 \cdot M \cdot N} \sum_{k=0}^2 \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} (F'(i, j, k) - u)^2 \quad (5)$$

式中, M 和 N 表示图像的行数和列数, u 表示整幅图的像素均值, $F'(i, j, k)$ 表示图像第 k 个通道在 (i, j) 的像素值。

平均梯度反应了图像中微小细节反差和纹理变化特征,可用来评价图像的模糊程度。在图像中,某一方向的灰度级变化越大,平均梯度越大,细节也越丰富,纹理越清楚。其计算公式为

$$\Delta \bar{g} = \frac{\sum_{k=0}^2 \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} \sqrt{\frac{\Delta_i^2 F'(i, j, k) + \Delta_j^2 F'(i, j, k)}{2}}}{3 \cdot (M - 1) \cdot (N - 1)} \quad (6)$$

式中, $\Delta_i F'(i, j, k)$, $\Delta_j F'(i, j, k)$ 分别是图像第 k 个通道在行、列方向的梯度。

熵描述了图像的信息量,反映了图像中像素位置的灰度信息和像素邻域内灰度分布的综合特征。图像熵的计算公式为

$$H(p) = - \sum_i \sum_j p(i, j) \ln p(i, j),$$

$$p(i, j) = \frac{x(i, j)}{\sum_i \sum_j x(i, j)}$$

表 1 和表 2 分别是对图 5 和图 6 中各图像的方差、平均梯度和信息熵的比较。从表 1 可以看出,直方图均衡化虽然很大程度上提高了图像的对比度,并且降低了图像的模糊程度,但使得图像的细节信息有所丢失。分片光滑算子与高斯卷积相比,不仅有效降低了图像的模糊程度,还使得图像的细节信息更加明显,截断拉伸的应用也进一步提高了图像质量。同时表 2 的统计数据也验证了分片光滑算子对图像质量的改进,而对反射图像的细节增强也得到了很好的效果。结果表明,应用改进的 Retinex 图像处理框架进行图像增强后,图像质量在方差、平均梯度和信息熵等统计量上都有显著提高,和我们的主观判别结果相符。

表 1 图像 5 处理前后方差、平均梯度和信息熵的比较

Tab.1 Comparison of different results of images in Fig. 5

	图 5(a)	图 5(b)	图 5(c)	图 5(d)	图 5(e)	图 5(f)
方差	1856.9	5449.3	1887.4	1860.9	2051.3	2396.2
平均梯度	5.13	10.9610	6.4795	9.1830	9.6342	10.2855
熵	6.6497	6.4115	6.6763	6.9809	7.0503	7.1000

表 2 图像 6 处理前后方差、平均梯度和信息熵的比较

Tab.2 Comparison of different results of images in Fig. 6

	图 6(a)	图 6(b)	图 6(c)	图 6(d)
方差	181.55	1886.4	2076.8	2830.7
平均梯度	1.5963	4.9871	8.9713	10.4925
信息熵	4.8183	7.2213	7.3477	7.5431

4 结论

针对传统 Retinex 算法框架存在的问题,本文提出了一种基于分片光滑照度估计的 Retinex 图像处理框架,框架中采用分片平滑的算子进行照度估计,有效消除了反射图像中的光晕现象。同时,在原框架中引入照度校正和反射校正功能,对照度图像进行压缩或拉伸,对反射图像进行细节增强或去噪,进一步提高了输出图像的质量。实验结果表明,本文提出的图像处理框架效果良好,具有很好的细节表现力和动态范围调节能力。

参考文献:

[1] Kimmel R. A Variational Framework for Retinex[J]. International Journal of Computer Vision, 2003, 52(1):7-23.
 [2] Hurlbert A. Formal Connections Between Lightness Algorithms[J].

J. Opt. Soc. Amer. 1986:1684-1692.
 [3] Funt B, Ciurea F, McCann J. Retinex in matlab[J]. J. Electron. Imag. Jan. 2004, 13(1): 48-57.
 [4] Jobson D J, Rahman Z, Woodell G A. Properties and Performance of a Center/Surround Retinex [C]//IEEE Trans. Image Process, 1997:451-462.
 [5] Jobson D, Rahman Z, Woodell G A. A Multiscale Retinex for Bridging the Gap Between Color Images and the Human Observation of Scenes[C]//IEEE Trans. Image Process, 1997, 6(7):965-976.
 [6] Elad M, Kimmel R, Shaked D, et al. Reduced Complexity Retinex Algorithm via the Variational Approach [J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2003:369-388.
 [7] Aurich V, Weule J. Non-linear Gaussian Filters Performing Edge Preserving Diffusion [C]//Proceedings of the DAGM Symposium, 1995:538-545.
 [8] Perona P, Malik J. Scale-space and Edge Detection Using Anisotropic Diffusion [J]. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1990, 12(7):629-639.
 [9] Chan T F, Osher S, Shen J. The Digital TV Filter and Nonlinear Denosing[J]. IEEE Trans. Image Processing, 2001, 10:231-241.
 [10] Buades A, Coll B, Morel J M. A Review of Image Denoising Algorithms, with a new one[J]. Industrial and Applied Mathematics, 2005, 4(2): 490-530.
 [11] Zibulevsky M, Elad M. L1-L2 Optimization in Signal and Image Processing[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2010, 27(3): 76-88.
 [12] 曾嘉亮. Gamma 校正的快速算法及其 C 语言实现[J]. 信息技术, 2006(4):82-85.
 [13] 李昀儒. 改良式 Retinex 的色彩影像强化研究[D]. 台湾: 世新大学, 2005.
 [14] 雷玲,周荫清,李景文. Retinex 理论在航空影像增强中的应用[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 7(30):1382-1385.