

## 基于不同色彩空间融合的快速图像增强算法

肖进胜<sup>1,2</sup> 单姗姗<sup>3</sup> 段鹏飞<sup>4</sup> 涂超平<sup>1</sup> 易本顺<sup>1</sup>

**摘要** 针对现有 Retinex 算法中存在的色彩失真、噪声放大及光晕伪影现象等问题, 本文提出了一种基于 Retinex 理论的改进算法. 该算法首先在 HSV 空间对亮度分量 V 通道进行增强处理, 同时在拉伸得到的对数域反射分量至一定的动态范围时 (本文是 0~255), 引入增强调整因子, 调整不同亮度值的增强程度来避免噪声放大及色彩失真现象; 然后在 RGB 空间, 通过分析光晕产生的原因, 提出一种改进的高斯滤波器来消除光晕现象, 并在计算反射分量时, 通过参数调整图像颜色的保真度. 最后, 对上述两种不同颜色空间的处理结果进行加权平均作为算法的最终输出. 实验结果表明, 针对不同光照条件下的图像, 1) 该算法可以明显地改善光晕伪影现象; 2) 无色彩失真、噪声放大等问题; 3) 效果和效率优于带色彩恢复的多尺度 Retinex 算法 (Multi-scale retinex with color restoration, MSRCR) 及其他对比算法.

**关键词** Retinex 理论, 带色彩恢复的多尺度 Retinex (MSRCR), 光晕伪影, 图像增强

**引用格式** 肖进胜, 单姗姗, 段鹏飞, 涂超平, 易本顺. 基于不同色彩空间融合的快速图像增强算法. 自动化学报, 2014, 40(4): 697-705

**DOI** 10.3724/SP.J.1004.2014.00697

## A Fast Image Enhancement Algorithm Based on Fusion of Different Color Spaces

XIAO Jin-Sheng<sup>1,2</sup> SHAN Shan-Shan<sup>3</sup> DUAN Peng-Fei<sup>4</sup> TU Chao-Ping<sup>1</sup> YI Ben-Shun<sup>1</sup>

**Abstract** A fast image enhancement algorithm based on fusion of different color spaces is proposed to overcome the problems of color distortion, noise amplification, and halo artifacts. Firstly, a single scale retinex is used in channel V of the HSV color space. An enhancement adjustment factor is introduced, when we stretch the calculated reflection in the logarithmic domain into a dynamic range, i.e., 0~255. It is used to adjust the enhancement for different pixels. Thus noise amplification and color distortion can be effectively avoided. Then, the improved Gaussian filter is given in the RGB color space by analyzing the cause of the halo effect. This step can eliminate the halo artifact. And a parameter is adopted to keep the color natural of the image when the reflection is calculated. Finally, the weighted average of the outputs of the above two color spaces is taken as the final output of our algorithm. The experiment results show that for images with different lighting conditions, 1) the outputs of our algorithm is free from the halo artifacts; 2) there are no color distortion and noise amplification problems; 3) the quality and the efficiency of the algorithm are superior to the multi-scale retinex algorithm (MSRCR) and other comparison algorithms.

**Key words** Retinex theory, multi-scale retinex with color restoration (MSRCR), halo artifact, image enhancement

**Citation** Xiao Jin-Sheng, Shan Shan-Shan, Duan Peng-Fei, Tu Chao-Ping, Yi Ben-Shun. A fast image enhancement algorithm based on fusion of different color spaces. *Acta Automatica Sinica*, 2014, 40(4): 697-705

图像增强技术在医学、工业检测、地貌学及军事等多个领域都有着极为广泛的应用, 利用图像增

强技术, 可以使图像获得更佳的视觉效果, 提高人眼对信息的辨别能力. 现有的图像增强技术根据其处理所在的空间不同, 可以分为基于空域的方法和基于变换域的方法两类. 为了提高图像的视觉效果, 恰当的模拟人眼视觉系统成为研究的关键. Retinex 理论是一种基于空域的图像增强方法, 该理论模拟人类大脑视觉皮层的成像原理, 建立了简化的图像形成模型. 20 世纪 70 年代, Edwin Land 系统地提出了 Retinex 模型, 并将其应用到图像增强. 90 年代, Jobson、Rahman 和 Woodell 等人在 Land 中心/环绕 Retinex 基础上提出了单尺度的 Retinex 算法<sup>[1]</sup>, 采用高斯卷积函数来估算图像的照射分量, 在一个尺度内用加权平均代替原有的像素值, 色彩保真度和图像的局部细节很难同时保证. 多尺度的

收稿日期 2012-11-30 录用日期 2013-11-01  
Manuscript received November 30, 2012; accepted November 1, 2013

国家自然科学基金 (91120002, 61201442) 资助  
Supported by National Natural Science Foundation of China (91120002, 61201442)

本文责任编辑 戴琼海

Recommended by Associate Editor DAI Qiong-Hai

1. 武汉大学电子信息学院 武汉 430072 2. 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室 武汉 430079 3. 华为技术有限公司武汉研究所 武汉 430073 4. 江西省邮电规划设计院有限公司 南昌 330000

1. School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430072 2. State Key laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079 3. Huawei Technologies Co., LTD., Wuhan Research Institute, Wuhan 430073 4. Jiangxi Province Post and Telecommunications Planning and Design Institute Co., LTD, Nanchang 330000

Retinex 算法一定程度上缓解了单尺度 Retinex 算法的天生缺陷,既可以保持图像色彩的保真度,又能保证图像的细节不至于丢失. Jobson 等人引入色彩恢复的概念,利用原图各波段的色彩比例因子对图像进行色彩恢复,提出了带色彩恢复的多尺度 Retinex 算法 MSRRCR<sup>[2]</sup>,对彩色空间的选择没有太多的要求,使用起来更加灵活.但是该算法在明暗对比强烈的边缘处,会出现光晕伪影现象,并有部分色彩失真现象.

近几年就如何解决光晕伪影及色彩失真现象,很多学者进行研究并提出解决方案.根据算法处理色彩空间的不同,大致可以分为基于 RGB 空间的算法和基于 HSV 空间的算法.基于 RGB 空间的算法,有通过改进环绕函数来实现的(例如, Meylan 等人提出的结合 PCA 方法的自适应的非线性滤波器<sup>[3]</sup>;迟健男等人提出的基于反对称双正交小波重构方法的滤波器<sup>[4]</sup>;Choi 等人提出的基于恰辨差异(Just noticeable difference, JND)的非线性滤波器<sup>[5]</sup>;文献[6]使用基于低阶技术和重叠平均的图像滤波方法,对单幅灰度或彩色图像进行视觉增强),也有对算法整体进行改进的(例如,Bo Li 等人提出通过反射分量来获取细节部分,利用像素及其周围像素的光照分量来保持场景的自然性<sup>[7]</sup>;还有作者将一幅图像分成不同的照度区域,进行不同的处理<sup>[8]</sup>;文献[9]结合参量自适应的非线性函数调整亮度,依据色调恒定的理论保持增强后图像的颜色);也有作者基于灰度调算法的灰度图像假设,利用有效像素的灰度级范围,消除灰化效应和光晕效应<sup>[10]</sup>, Hanumantharaju 等人提出了一种改进的色彩恢复算法,在算法的主观效果及算法效率上均有一定改善<sup>[11]</sup>.基于 HSV 空间的改进算法主要有: Mukherjee 等人提出了一种基于 DCT 的算法,在 HSV 空间不仅对亮度分量 V 做处理,还通过调节色度分量,来改善增强图像的饱和度等<sup>[12]</sup>;Yu 等人提出一种基于 HSV 色彩空间的(HSV-integrated multi-scale retinex, HSV-IMSR)算法,通过增强后的亮度分量 V 来调整饱和度来消除色彩失真问题及光晕现象<sup>[13]</sup>.在以上这些算法中,文献[3-6, 8, 10, 13]均可以达到消除光晕的效果,但是这些算法未考虑算法的复杂度.

本文受以上算法的启发,针对传统的 MSRRCR (Multi-scale Retinex with color restoration) 算法易产生的光晕伪影问题,采用了改进的高斯模板,在保证处理效果的基础上,消除了 MSRRCR 算法中的高斯模板引起的光晕伪影现象,同时提高了算法效率;同时本文在基于灰度世界(Gray world)假设理论的基础上,采用了基于 HSV 空间的色彩增强理论,在保持图像鲜艳度的同时,避免色彩失真现象;经典算法对于部分图像在亮度低或亮度高的部分,

出现过增强现象,引入了大量噪声,本文通过引进增强调整因子,克服了此缺陷.实验分析表明,本文的改进算法可以高效解决光晕伪影现象及色彩失真、噪声放大等问题.

## 1 基于 Retinex 理论的图像增强算法

### 1.1 Retinex 理论

Retinex 理论是由 Edwin Land 在 20 世纪 70 年代提出的一种颜色恒常知觉的色彩理论,是关于人类视觉系统怎样调节感知到物体颜色和亮度的理论. Retinex 理论解释了同样的物体在不同的光源或光线底下颜色恒定(Color constancy)的机理.在 Retinex 模型中,图像  $I$  是由两部分组成的:一部分是物体的光亮亮度,对应于图像的低频部分,其决定了图像中像素能达到的动态范围,通常我们称之为亮度图像,用  $L$  表示;另一部分是物体的反射亮度,对应于图像的高频部分,决定一幅图像的内在性质,通常我们称之为反射图像,用  $R$  表示.则该模型表达式可以表示为:  $I = R \cdot L$ . Retinex 理论的目的就是为了从图像  $I$  中获得物体的反射性质  $R$ ,即抛开入射光的性质来获得物体的本来面貌.对数形式接近人眼亮度感知能力,同时可以将复杂的乘积形式变成简单的加减运算.对该式两端取对数,可以得到式子:  $\log(I) = \log(R) + \log(L)$ .由于不能直接从图像中得到物体的反射部分,但可以通过先估计入射光部分  $\log(L)$ ,从而得到反射部分  $\log(R)$ .

### 1.2 带色彩恢复的多尺度 Retinex 算法 (MSRRCR)

基于 Retinex 理论的算法是通过估计入射光部分  $L$  得到的反射部分  $R$ <sup>[1]</sup>,可用式(1)表示:

$$R_i(x, y) = \log I_i(x, y) - \log[F(x, y, c) * I_i(x, y)] \quad (1)$$

其中  $R_i(x, y)$  表示第  $i$  个颜色分量的反射部分(对数域),  $I_i(x, y)$  表示第  $i$  个颜色分量图像,  $*$  表示卷积,  $F(x, y, c) = Ke^{-(x^2+y^2)/c^2}$  为环绕函数,  $c$  是高斯函数的参数,  $K$  由归一化函数  $\iint F(x, y, c) dx dy = 1$  得到.

多尺度即多个不同的高斯函数参数  $c$ , 通过加权不同尺度所得到的不同的反射亮度的总和得到多尺度 Retinex 算法输出,如式(2):

$$R_{MSR,i} = \sum_{n=1}^N w_n R_{n,i} \quad (2)$$

其中  $N$  是尺度数,一般  $N = 3$ ,  $R_{n,i}$  表示第  $i$  通道第  $n$  个尺度的反射亮度,  $R_{MSR,i}$  为第  $i$  通道多尺度

加权所求得的反射亮度,  $w_n$  为第  $n$  个尺度的权值, 通常  $w_n = 1/N$ .

带色彩恢复的多尺度 Retinex 算法, 就是将多尺度 Retinex 求得的反射亮度  $R_{MSR,i}$  乘以色彩恢复因子  $C_i$ , 来调节 3 个通道的颜色比例, 具体实现如式 (3) 和式 (4):

$$R_{MSRCR,i} = C_i \cdot R_{MSR,i} \quad (3)$$

$$C_i = \log[\alpha \cdot I_i(x, y)] - \log\left[\sum_{i=1}^3 I_i(x, y)\right] \quad (4)$$

对得到的  $R_{MSRCR,i}$  求得其均值  $\mu$  和标准差  $\sigma$ ,  $\alpha$  为常系数 (一般取 0.5~2.0 之间), 记  $\max = \mu + \alpha \cdot \sigma$ ,  $\min = \mu - \alpha \cdot \sigma$ , 将  $R_{MSRCR,i}$  标准化为  $R_{MSRCR,i}^*$ , 如式 (6):

$$R_{MSRCR,i}^* = 255 \cdot \frac{(R_{MSRCR,i} - \min)}{(\max - \min)} \quad (5)$$

MSRCR 算法的物理意义是在对数空间将原图减去高斯函数与原图像的卷积的值, 实际上原图像被减去了平滑的部分. 而高斯函数中  $c$  越小, 图像中低频成分减去的越多, 剩下的图像中高频成分, 从而突出了原图像中的细节. 因此对于图像中存在严重暗的区域, 通过 MSRCR 算法增强后, 突出了暗区域的细节. 但是, 增强后的图像对比度减弱, 整体偏亮, 颜色与原图偏移很大甚至失真<sup>[9]</sup>.

## 2 基于改进的 Retinex 理论图像增强算法

带色彩恢复的多尺度 Retinex 算法虽在动态范围压缩、颜色和亮度恒常性等方面能取得较好的结果, 但处理后的图像仍存在颜色失真、原图噪声被放大以及光晕伪影的问题. 该算法的另一缺陷是运算复杂度高, 处理单帧图像耗时过长. 为了得到一种快速的, 无光晕及色彩失真的图像增强算法, 本文提出一种基于 Retinex 理论的图像增强改进算法, 该算法包括两部分: 1) 基于 HSV 空间的图像增强; 2) 在 RGB 空间, 结合改进高斯滤波器及调整参数因子的快速增强. 最后将这两部分处理结果加权平均得到最终的处理效果.

### 2.1 基于 HSV 空间的图像增强

对于彩色图像 RGB 三通道进行增强, 由于不能保证增强幅度一致, 易导致颜色失真. MSRCR 等彩色图像增强算法均基于灰度世界假设. 该假设是指当一幅图像中有足够多的颜色变化时, RGB 各分量的平均值会趋于相等. 但若被处理的图像某颜色成分较多时, 则不满足此假设, 处理结果则会趋于灰色<sup>[7]</sup>. 虽然 MSRCR 考虑到颜色的相关性, 但基于“灰度世界假设”的颜色复原函数的提出尚缺乏严格

的神经生理学理论支持, 并未保持色调恒定, 存在颜色偏移甚至失真.

在 RGB 空间三维矢量  $[R, G, B]$  不仅表示了颜色, 也包含了亮度信息. 如果两个像素点  $[R1, G1, B1]$ 、 $[R2, G2, B2]$  在 RGB 空间的值是成比例的, 如下式:

$$\frac{R2}{R1} = \frac{G2}{G1} = \frac{B2}{B1} = K \quad (6)$$

那么这两点具有相同的颜色, 只是亮度不同, 且亮度增量为  $K$ . 如果增强后的图像和原图满足上式, 那么增强后图像的颜色信息保持不变, 但整体亮度得到了增强, 颜色较原图颜色更加鲜艳, 不存在颜色失真问题, 如图 1 所示.



图 1 颜色恒定图 (左: 原图, 右: 三通道像素值均放大 2 倍图)

Fig.1 Color constant images (Left: original; Right: three-channel pixels with proportional amplifier two times)

为了增强整幅图像, 需要求得每个像素点的亮度增量, 就要得到待增强图像的亮度增益曲线  $K(x, y)$ , 故先从原图像中提取出亮度分量. HSV 颜色空间的  $V$  分量即为亮度分量, 对  $V$  分量的处理可以等效为对 RGB 三通道最大值的处理<sup>[14]</sup>, 故亮度分量提取如式 (7):

$$V(x, y) = \max\{R(x, y), G(x, y), B(x, y)\} \quad (7)$$

根据 Retinex 理论, 亮度分量的反射分量如式 (8):

$$V_{enh} = \log[V(x, y)] - \log[F(x, y, c) * V(x, y)] \quad (8)$$

其中  $F(x, y, c)$  为式 (1) 中的环绕函数, 为了提高代码运算效率, 高斯滤波采用近似的均值滤波, 并采用窗口无关快速均值滤波 (Fast mean filter, FMF) 算法<sup>[15]</sup>, 我们发现, 采用 FMF 算法, 在保证输出图像效果 (如图 2 所示) 不变差的基础上, 滤波效率提高了约 50% (详见表 1).

上述过程得到增强后的亮度分量在整体上较增强前的亮度分量有了较大的增强, 无论是在原图亮度低的部分抑或是亮度高的部分. 这样使得彩色图像暗区出现大量的噪声并使亮区由于增强而失去原有的细节. 为了解决以上问题, 我们提出了增强调整因子  $S(x, y)$ , 其定义如式 (9):

$$S(x, y) = \beta \cdot \sin[\pi \cdot V(x, y)/255] \quad (9)$$

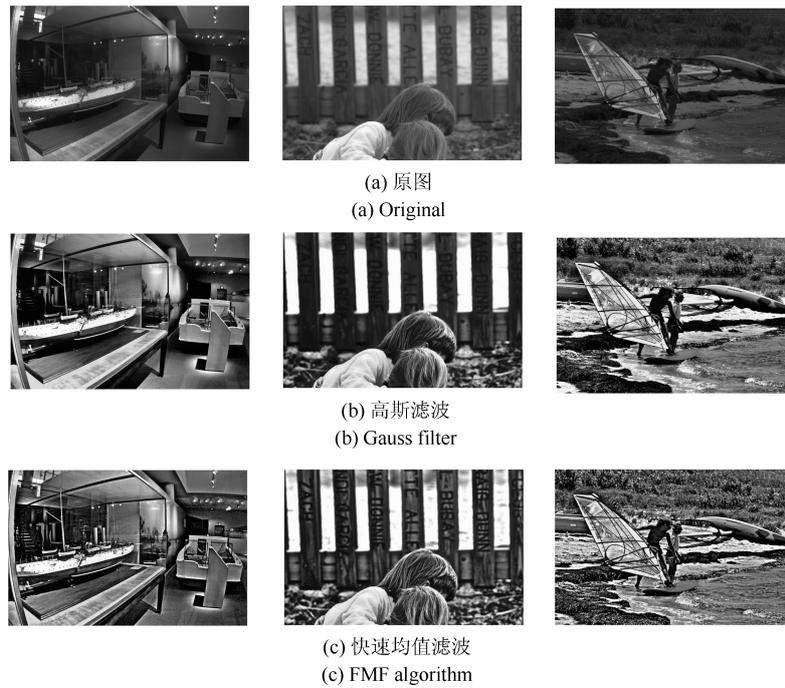


图 2 采用高斯滤波和 FMF 算法效果对比

Fig. 2 Visual comparisons of the results obtained by the Gaussian filter and the FMF algorithm

表 1 采用高斯滤波和采用快速均值滤波算法客观指标对比 (图像大小: 2000 × 1312)

Table 1 Comparative evaluations between the Gaussian filter and FMF algorithm (Images size: 2000 × 1312)

	室内				小孩				冲浪			
	均值	清晰度	熵	处理时间 (s)	均值	清晰度	熵	处理时间 (s)	均值	清晰度	熵	处理时间 (s)
原图	61.93	1.81	4.92	—	94.19	2.32	5.14	—	56.26	3.51	4.73	—
高斯滤波	90.16	4.48	5.34	1.0	102.1	9.23	5.27	1.0	98.23	11.57	5.36	1.0
快速均值	88.67	6.34	5.35	0.5	103.7	11.54	5.34	0.51	97.54	15.10	5.39	0.5

× Inter(R) Core(TM)i3 CPU 530 @2.93 GHz, 2.93 GHz, 4.00 GB

其中  $V(x, y)$  表示待增强亮度值,  $\beta$  表示增调整因子对亮度的调节幅度, 实验表明, 选取  $0.5 \sim 1$  效果较为理想. 增强后的亮度分量乘上调整因子  $S(x, y)$ , 如式 (10):

$$V_{enh}^*(x, y) = S(x, y) \cdot V_{enh}(x, y) \quad (10)$$

根据  $\sin$  正弦曲线的特性, 当原亮度图像  $V(x, y)$  趋于零或者趋于 255 时, 调整因子  $S(x, y)$  趋于 0, 这样防止对原图暗区过增强而出现大量噪声, 同时防止原图亮度比较高的区域增强后失去纹理细节. 加入增调整因子前后对比图如图 3 所示. 在图中暗区, 由于过增强出现了噪声现象, 如图 3 (b) 中圆圈区域内. 通过对图像中不同亮度区域加入不同增调整因子, 消除了此现象 (如图 3 (c) 圆圈区域所示).

对增强后的亮度分量线性拉伸至  $0 \sim 255$  的范

围, 并求亮度增益曲线, 如式 (11):

$$K(x, y) = \frac{V_{enh}^*(x, y)}{V(x, y)} \quad (11)$$

由式 (9) 和 (10) 可以看出当原图像素值越接近 255 时, 所得增强后的像素值越接近 0, 这样会使得原图高亮区增强后趋于急剧变暗, 故为了使图像的亮度增强后不下降, 我们将增强后的亮度分量和原图亮度分量比较, 取两者中的较大值, 即如果  $K(x, y) < 1$  则取  $K(x, y) = 1$ . 求得亮度增益曲线后, 增强后的  $R, G, B$  值计算如下:

$$\begin{cases} R_1(x, y) = R(x, y) \cdot K(x, y) \\ G_1(x, y) = G(x, y) \cdot K(x, y) \\ B_1(x, y) = B(x, y) \cdot K(x, y) \end{cases} \quad (12)$$

其中  $R(x, y), G(x, y), B(x, y)$  为原图的  $R, G, B$  值,

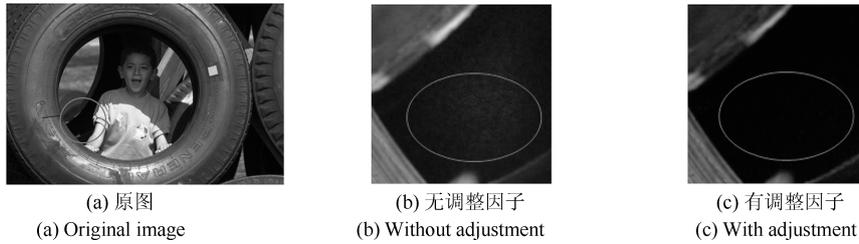


图 3 加入增强调整因子前后对比图

Fig. 3 The compared results of the algorithm with and without adjustment factor

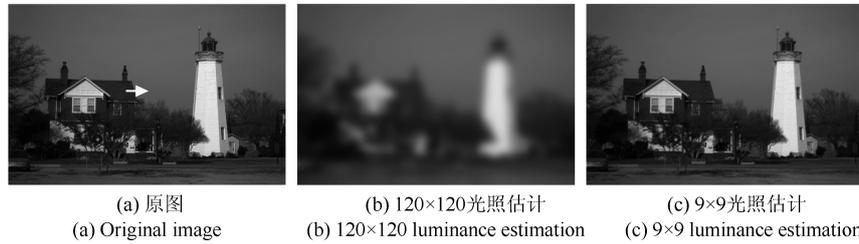


图 4 光照估计图

Fig. 4 The results of luminance estimation

$R_1(x, y), G_1(x, y), B_1(x, y)$  为增强后的  $R, G, B$  值.

通过基于 HSV 空间的处理, 在避免色彩失真的情况下, 图像整体的色彩对比度及鲜艳度得到了明显的提升. 接下来我们对单尺度 Retinex 算法进行改进, 通过改进环绕卷积函数, 消除光晕现象, 同时使图像的细节、纹理等信息更加突出.

## 2.2 细节增强

MSRCR 中的  $F(x, y, c)$  为高斯滤波器,  $c$  为其唯一参数, 是 MSRCR 的关键参数, 称之为尺度参数.  $c$  越小时, 增强图像的动态压缩范围能力越强, 图像中阴暗部分的细节得到较好的增强, 但是输出图像颜色失真比较严重; 反之  $c$  越大时, 输出图像的颜色保真度越好, 但动态压缩能力减弱<sup>[16]</sup>. MSRCR 在光照估计步骤中假设图像的光照变化是均匀的, 实际情况并非如此. 估计光照分量时, 在明暗对比强烈的边缘区域, 这两部分会相互影响, 使得原图较亮处的光照分量可能变暗, 同样原图较暗处的光照分量可能变亮, 这样便在该区域造成光晕伪影, 如图 4 所示. 其中, 图 4(a) 是原图, 图 4(b) 和 4(c) 是高斯滤波后所得的光照估计, 注意白塔和天空交界部分, 由于白塔内部亮度比较高, 像素值在 200 以上, 而白塔周围的天空的像素值为 90 左右, 这样在光照估计过程中白塔内部会影响到其周围的天空, 使得光照估计后周围天空变亮, 其像素值达到 120 左右, 而这与没有受此影响的天空所得到的光照估计值相差很大, 故在白塔周围有光晕现象. 光晕伪影现象产生的根本原因在于通过低通滤波估计光照分量时, 滤波窗口内的像素值和中心像素值相差很大,

从而使得滤波后该像素与原图该像素的像素值改变过大. 前文所提到的反对称双正交小波滤波<sup>[4]</sup>、最小可觉视差 (Just noticeable difference, JND) 滤波器<sup>[5]</sup>、Meylan 等人的自适应非线性滤波<sup>[3]</sup> 以及双边滤波, 正是考虑到该问题, 均能消除光晕伪影现象, 但这些算法计算量过大.

为了消除光晕现象, 同时保证算法速率和效果, 采用  $9 \times 9$  高斯滤波窗口来估计光照分量, 用  $9 \times 9$  高斯滤波窗口的光照估计如图 4(c) 所示. 我们选取白塔和天空交界的某一处, 比较其像素值变化情况: 将图 4 中 3 幅图同一行像素值 ( $x \in [1\ 240, 1\ 385]$ ,  $y = 627$ , 约为图 4(a) 中箭头的位置) 的变化如图 5 所示.

从图 5 中可以看出  $c = 120$  的高斯模板在交界处天空的像素值要高于原图, 而在塔身处又低于原图处的像素值, 根据  $I = R * L$  得到的反射分量在交界处的像素分布刚好相反, 因此会产生光晕现象. 经过实验, 我们选取  $9 \times 9$  的高斯模板, 一方面可以消除光晕现象; 另一方面, 主观效果得到了保证. 从图 5 中也可以看出, 经过  $9 \times 9$  的高斯模板得到的光照估计分量基本和原图是一致的, 从侧面反映了消除光晕的实质.

前面提到, 采用小尺度的高斯模板, 我们可以得到动态范围较好的增强图像, 但是其色彩的保真度得不到保障, 因此本算法在式 (1) 的原图部分, 引入参数  $\alpha$ , 得到的反射分量如式 (13) 所示:

$$R_i(x, y) = \alpha \log I_i(x, y) - \log[F(x, y) * I_i(x, y)] \quad (13)$$

其中  $R_i(x, y)$  表示第  $i$  个颜色分量的反射部分,  $I_i(x, y)$  表示第  $i$  个颜色分量原图像,  $\alpha$  可取 1.5~2,  $F(x, y)$  表示通过  $9 \times 9$  高斯滤波窗口.

得到了反射分量后, 按式 (4) 引入彩色恢复因子, 最后按式 (5) 拉伸至 0~255 得到该部分的结果. 该部分增强后消除光晕的效果以及和 NASA 对比如图 6 所示. 图 6(a) 为原图, 可以看到方框内的白塔与天空交界部分明暗对比强烈. 图 6(b) 和图 6(c) 分别为采用高斯滤波增强的结果和 NASA 增强结果中的白塔部分. 图 6(c) 中可以看到白塔周围有较暗的光晕伪影, 而图 6(b) 中的塔身与天空交界处颜色自然并未出现光晕现象.

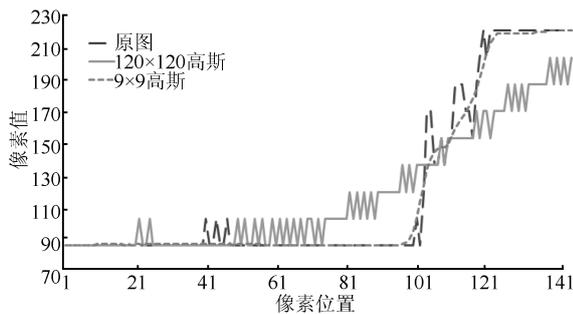


图 5 采用不同尺度滤波模板塔身周围像素变化

Fig. 5 The pixels change around the tower using different scale filter templates



图 6 消除光晕对比

Fig. 6 Comparison of eliminating halo artifacts

### 2.3 最终输出结果

经过以上分析, 本文首先在 HSV 空间基于单尺度 Retinex 理论, 用均值滤波模板代替高斯滤波模板, 得到了色彩增强图像; 然后在 RGB 空间, 利用单尺度的 Retinex, 用  $9 \times 9$  的高斯模板代替大尺度的高斯模板, 同时引入原图像得到了无光晕的细节增强图像; 最后将这两部分加权取平均值得到最终输出结果, 如式 (14) 所示:

$$\begin{cases} R_o(x, y) = b \cdot R_1(x, y) + (1 - b) \cdot R_2(x, y) \\ G_o(x, y) = b \cdot G_1(x, y) + (1 - b) \cdot G_2(x, y) \\ B_o(x, y) = b \cdot B_1(x, y) + (1 - b) \cdot B_2(x, y) \end{cases} \quad (14)$$

其中  $R_1(x, y), G_1(x, y), B_1(x, y)$  为色彩增强图像像素的  $R, G, B$  值,  $R_2(x, y), G_2(x, y), B_2(x, y)$  为细节增强图像像素的  $R, G, B$  值,  $R_o(x, y), G_o(x, y), B_o(x, y)$  为最终输出图像像素的  $R, G, B$  值,  $b$  的取值范围为:  $0 < b < 1$ , 一般取 0.5.

### 3 实验结果及讨论

测试所用计算机配置为: Inter(R) Core(TM) i5-2300 CPU@2.80 GHz, 2.79 GHz, 4.00 GB 内存. 测试使用的软件环境为 VS2005, 操作系统为 Windows XP. 本算法测试图片来自 <http://dragon.larc.nasa.gov/retinex/pao/news/>, 及一组相机拍摄的测试图片 kodim01~ kodim24, 于 <http://r0k.us/graphics/kodak/index.html>, 及手机拍摄图片 <http://www.apple.com.cn/iphone/gallery/> 和 <http://www.wpxap.com/thread-506641-1-1.html> 共 107 幅. 本文选取了其中的四幅图像: 男孩这张图片在强光下拍摄, 很难同时捕捉到亮处和阴影处的细节; 白塔和房屋这两张图片均拍摄于强光下, 其阴影处的细节及颜色均已丢失处理不当容易产生光晕, 细节不易恢复; 太空舱图片的舱内细节由于舱穹顶的反射而丢失, 处理不当会无法恢复细节.

下面给出本文提出方法的增强结果, 并与 MSRCR<sup>[2]</sup>、DCT (Discrete cosine transform) 算法<sup>[12]</sup>、HSV-IMSR<sup>[13]</sup> 和 NASA 网站处理结果相比较. 图 7(b)~(f) 分别为采用 MSRCR、DCT、HSV-IMSR、NASA(具体的技术细节未公开) 以及本文算法处理不同图像的实验效果对比图.

从图 7 中可以看出, MSRCR 处理结果出现了过增强现象, 增强后的图像均过饱和; 而 DCT 算法的处理结果会有一部分的颜色过增强问题, 并且图像清晰度不高, 由于采用  $8 \times 8$  的 DCT 变换, 还会产生块状效应; 而 HSV-IMSR 的处理结果整体颜色偏淡, 由于算法中有饱和度增强的部分, 故易在暗区产生色斑噪声; NASA 的处理结果并未出现颜色失真问题, 并且在动态范围压缩以及暗处的增强效果都比较好, 但其缺点在于放大了图像的噪声, 如图 7(e) 第一幅图的男孩身后的轮胎处出现了原图没有的噪声, 且有光晕伪影的现象, 再如图 7(e) 第二幅图中白色塔身周围出现了一圈光晕. 本文所提出的算法的两个部分均采用了单尺度的算法, 主观视觉效果上图像整体的饱和度略差于 NASA 结果, 但是本算法效率得到了极大的提高, 算法效果不仅不存在色彩失真而且消除了光晕伪影现象. 在暗区细节的显示上较 NASA 的结果更加明显, 另外消除了增

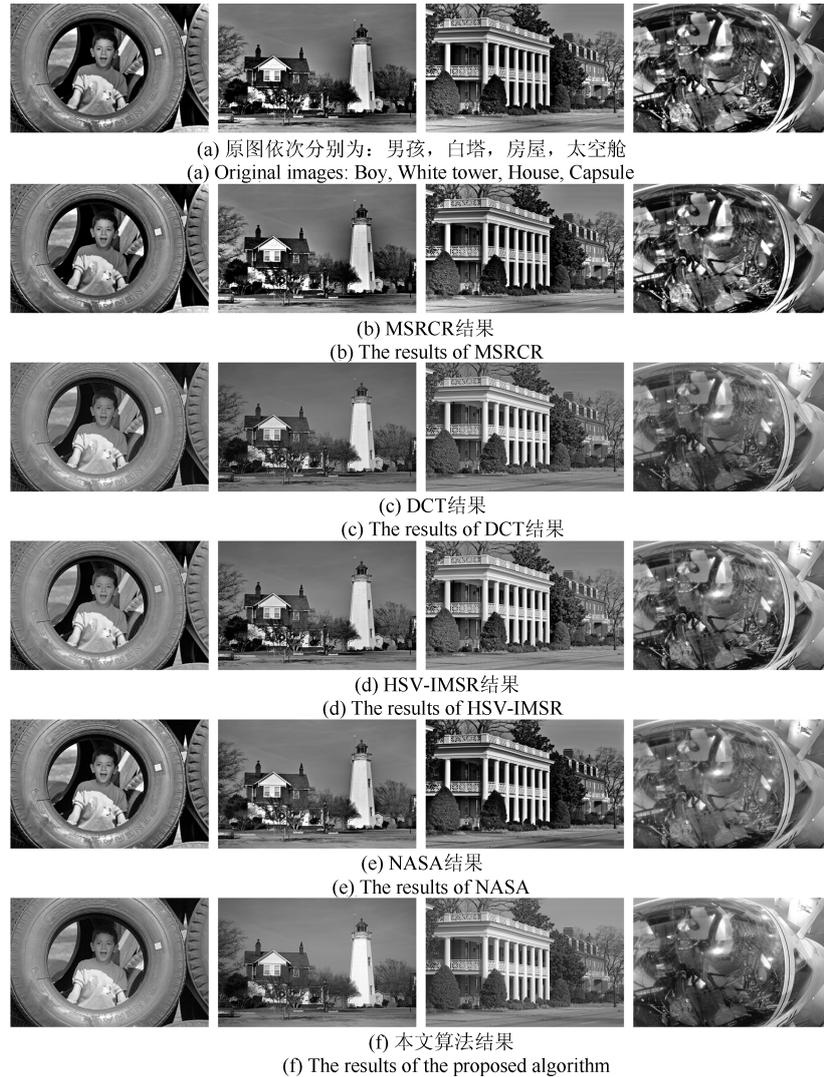


图7 各算法效果对比图

Fig.7 Comparison of different algorithms results

强所产生的噪声, 并且在图像对比度上也不逊于 NASA 的处理结果.

图像清晰度是对图像微小细节表现能力的一个反映, 可采用平均梯度法来衡量:

$$\Lambda = \frac{\sum_{i=1}^{R-1} \sum_{j=1}^{C-1} \sqrt{\frac{(Z_{i,j} - Z_{i+1,j})^2 + (Z_{i,j} - Z_{i,j+1})^2}{2}}}{(R-1)(C-1)} \quad (15)$$

其中,  $Z_{i,j}$  为第  $i$  行第  $j$  列的像素值;  $R$  和  $C$  为图像的行数和列数.

图像的结构相似性评价指标 (Structural similarity index measurement, SSIM) 用来衡量两幅图

像的相似度, 用式 (6) 来计算:

$$SSIM(x, y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + C_1)(2\sigma_{xy} + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)} \quad (16)$$

其中,  $\mu_x, \mu_y$  分别是两幅图像均值,  $\sigma_x, \sigma_y$  分别是两幅图像标准差,  $\sigma_{xy}$  是两幅图像的协方差,  $C_1, C_2$  是常量.

接下来给出本文实验对比算法的客观指标 (包括熵、清晰度、均值以及 SSIM 值) 及各算法的效率统计, 分别见表 2~4, 其中表 4 是对 107 幅图片的统计结果平均值.

由表 2 的测试结果可知, 对于图 7 中的图片, 本文算法得到的图像的熵、清晰度、均值等客观指标整体表现较好. 对于部分原始图像极暗、主观效果很差的测试序列, 本文算法对图像的整体增强以及细

表 2 不同色彩增强算法效果客观测试  
Table 2 Different color enhancement algorithms objective test results

		原图	MSRCR	DCT	HSV-IMSR	NASA	本文算法
男孩	熵	5.078	5.039	5.090	5.028	4.685	5.228
	清晰度	2.980	6.599	5.381	4.579	5.756	7.870
	均值	75.243	107.396	114.53	117.550	115.049	112.33
	SSIM	—	0.017	0.015	0.074	0.088	0.031
白塔	熵	4.584	5.001	4.914	5.009	4.970	5.042
	清晰度	2.073	7.818	5.593	5.385	8.422	8.594
	均值	57.237	105.929	97.668	104.138	110.339	111.17
	SSIM	—	0.058	0.050	0.086	0.035	0.041
房屋	熵	4.860	5.340	5.294	5.334	5.349	5.374
	清晰度	4.275	11.257	9.991	8.847	12.052	14.094
	均值	57.956	109.248	107.252	112.638	93.190	116.043
	SSIM	—	0.022	0.047	0.045	0.145	0.048
太空舱	熵	4.911	5.324	5.242	5.342	5.157	5.381
	清晰度	1.665	7.183	4.750	4.802	6.234	6.674
	均值	68.244	102.11	107.39	112.17	114.15	110.47
	SSIM	—	0.020	0.003	0.058	0.010	0.028

表 3 不同算法速度客观测试  
Table 3 The speed of different algorithms

处理时间 (ms)	MSRCR	DCT	HSV-IMSR	本文算法
男孩	1437	5656	700	300
白塔	1438	4750	705	296
房屋	1422	5360	703	299
太空舱	1423	4850	702	297

表 4 所有测试图片的平均指标  
Table 4 The average index of all test images

平均指标	熵	清晰度	均值	SSIM
MSRCR	5.023	6.970	116.031	0.087
DCT	5.075	8.263	115.520	0.044
HSV-IMSR	5.137	8.345	118.739	0.298
本文算法	5.108	11.028	121.804	0.311

节信息的增加要多于对比算法, 会出现 SSIM 值低于对比算法的现象. 由表 3 可知, 本文算法的速度效率优于对比算法. 从表 4 可以看出, 本文算法总体上除了熵值略低于 HSV-IMSR 算法外, 其他不论是图像的清晰度, 均值和 SSIM 值均优于对比算法, 达到了改善算法效果的目的.

本文在 MSRCR 基础上, 对其大高斯卷积模板

进行了改进. MSRCR 中有 3 个高斯模板, 模板的标准差大小分别为:  $\sigma_1 < 50, 50 < \sigma_2 < 100, \sigma_3 > 100$ . 如果采用高斯卷积的方法进行计算, 运算量是巨大的. 因此, 本文在单尺度 Retinex 基础上用 FMF 算法代替高斯滤波, 有效提高了算法效率. 其次, 在 2.2 节采用小尺度的改进高斯滤波模板和查表算法, 有效降低了算法时间复杂度. 从统计结果表 2、表 3 中也可以看出, 本文在 Retinex 理论的基础上进行了改进, 不仅使效率和客观指标的有提高, 而且也保证了主观质量的效果.

## 4 结论

针对基于 MSRCR 常见的几种问题: 色彩失真、噪声及光晕伪影现象, 本文提出了相应的改进算法, 实验结果表明本文算法基本解决了这几个问题. 并且主观效果、客观指标和算法的效率也有较大的提高.

## References

- 1 Jobson D J, Rahman Z, Woodell G A. Properties and performance of a center/surround retinex. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1997, **6**(3): 451–462
- 2 Jobson D J, Rahman Z, Woodell G A. 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
- 3 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

- 4 Chi Jian-Nan, Zhang Chuang, Zhang Zhao-Hui, Wang Zhi-Liang. Image enhancement based on anti-symmetrical biorthogonal wavelet reconstruction. *Acta Automatica Sinica*, 2010, **36**(4): 475–487  
(迟健男, 张闯, 张朝晖, 王志良. 基于反对称双正交小波重构的图像增强方法. 自动化学报, 2010, **36**(4): 475–487)
- 5 Choi D H, Jang I H, Kim M H, Kim N C. Color image enhancement based on single-scale retinex with a JND-based nonlinear filter. In: Proceedings of IEEE International Symposium on Circuits and Systems. New Orleans, USA: IEEE, 2007. 3948–3951
- 6 Zhang Y Q, Ding Y, Xiao J S, Liu J Y, Guo Z M. Visibility enhancement using an image filtering approach. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2012, **2012**(1): 1–6
- 7 Li B, Wang S H, Geng Y B. Image enhancement based on Retinex and lightness decomposition. In: Proceedings of the 18th IEEE International Conference on Image Processing. Brussels: IEEE, 2011. 3417–3420
- 8 Wang Rong-Gui, Zhu Jing, Yang Wan-Ting, Fang Shuai, Zhang Xin-Tong. An improved local multi-scale Retinex algorithm based on illuminance image segmentation. *Acta Electronica Sinica*, 2010, **38**(5): 1181–1186  
(汪荣贵, 朱静, 杨万挺, 方帅, 张新彤. 基于照度分割的局部多尺度 Retinex 算法. 电子学报, 2010, **38**(5): 1181–1186)
- 9 Liu Wei-Hua, Sui Qing-Mei. A hue preserving MSR algorithm of image enhancement. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(4): 642–646  
(刘伟华, 隋青美. 基于色调恒定的 MSR 图像增强算法. 光子学报, 2011, **40**(4): 642–646)
- 10 Yu Jing, Li Da-Peng, Liao Qing-Min. Color constancy-based visibility enhancement of color images in low-light conditions. *Acta Automatica Sinica*, 2011, **37**(8): 923–931  
(禹晶, 李大鹏, 廖庆敏. 基于颜色恒常性的低照度图像能见度增强. 自动化学报, 2011, **37**(8): 923–931)
- 11 Hanumantharaju M C, Ravishankar M, Rameshbabu D R, Ramachandran S. Color image enhancement using multi-scale Retinex with modified color restoration technique. In: Proceedings of the 2011 Second International Conference on Emerging Applications of Information Technology. Kolkata: IEEE, 2011. 93–97
- 12 Mukherjee J, Mitra S K. Enhancement of color images by scaling the DCT coefficients. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2008, **17**(10): 1783–1794
- 13 Yu J, Kim Y, Lee N, Tchoi Y S, Hahn H S. Effective color correction method employing HSV color model. *Journal of Measurement Science and Instrumentation*, 2012, **3**(1): 39–45
- 14 Wang W, Li B, Zheng J, Xian S. A fast multi-scale retinex algorithm for color image enhancement. In: Proceedings of International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition. Hong Kong, China: IEEE, 2008. 80–85
- 15 Wang Ke-Jun, Xiong Xin-Yan, Ren Zhen, Fu Bin. MSR image enhancement based on window irrelevant mean filter. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2010, **42**(9): 1467–1471  
(王科俊, 熊新炎, 任桢, 付斌. 基于窗口无关均值滤波的 MSR 图像增强. 哈尔滨工业大学学报, 2010, **42**(9): 1467–1471)
- 16 Rahman Z, Jobson D J, Woodell G A. Retinex processing for automatic image enhancement. *Journal of Electronic Imaging*, 2004, **13**(1): 100–110

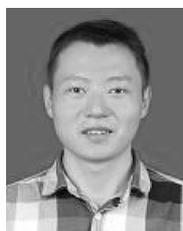


**肖进胜** 博士, 武汉大学电子信息学院副教授. 主要研究方向为视频图像处理、计算机视觉、多媒体网络通信. 本文通信作者. E-mail: js\_xiao@tom.com  
(**XIAO Jin-Sheng** Ph.D. associate professor at the School of Electronic Information, Wuhan University. His research interest covers video and image processing, computer vision, multimedia network communication. Corresponding author of this paper.)



**单姗姗** 硕士, 2013 年于武汉大学获得工学硕士学位. 现在任职于华为技术有限公司武汉研究所. 主要研究方向为图像处理、计算机视觉.  
E-mail: shanssz1988@163.com

(**SHAN Shan-Shan** Received her master degree from Wuhan University in 2013. Currently, she is working at the Huawei Technologies Co., LTD., Wuhan Research Institute. Her research interest covers computer vision and image processing.)



**段鹏飞** 硕士, 2013 年于武汉大学获得工学硕士学位. 现为江西省邮电规划设计院有限公司高级工程师. 主要研究方向为视频图像处理.  
E-mail: dpfqc283294984@163.com

(**DUAN Peng-Fei** Received his master degree from Wuhan University in 2013. Currently, he is working at the Jiangxi Province Post and Telecommunications Planning and Design Institute Co., LTD.. His research interest covers video image processing.)



**涂超平** 2012 年于武汉大学获工学学士学位, 现为武汉大学电子信息学院硕士生. 主要研究方向为视频图像处理与显示. E-mail: humemarx@gmail.com

(**TU Chao-Ping** Received his bachelor degree from Wuhan University in 2012. Currently, he is pursuing the M.E degree in the School of Electronic Information, Wuhan University. His research interest covers video and image processing and display.)



**易本顺** 博士, 教授, 武汉大学电子信息学院博士生导师. 主要研究方向为图像处理多媒体网络通信.  
E-mail: yihs@whu.edu.cn

(**YI Ben-Shun** Ph.D., professor at the School of Electronic Information, Wuhan University. His research interest covers image processing and multimedia network communication.)