

# 一种基于改进 Mean Shift 滤波的 Retinex 彩色图像增强算法

周 扬 孙 瑾 牛 犇

(南京航空航天大学民航学院 南京 211106)

(南京航空航天大学飞行模拟与先进培训工程技术研究中心 南京 211106)

**摘 要** 传统的中心/环绕 Retinex 图像增强方法在处理低对比度彩色图像时,易产生光晕现象和色彩失真。提出一种基于改进 Mean Shift 滤波的 Retinex 方法,首先采用主元分析法(PCA)将低对比度图像分解为亮度和色彩两部分,通过改进现有 Mean Shift 滤波方法实现光照分量的自适应增强,并对色彩通道进行恢复,最后在全局分析基础上进行图像补偿。实验结果证明,该方法能有效抑制光晕现象,并保持色彩一致性,运行速度也优于同类自适应方法。

**关键词** Retinex, 图像增强, Mean Shift, 主元分析法

中图法分类号 TP391.4 文献标识码 A

## Retinex-based Color Image Enhancement Algorithm by Improved Mean Shift Filtering

ZHOU Yang SUN Jin NIU Ben

(College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

(Engineering Technology Research Center of Flight Simulation and Advanced Training,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

**Abstract** To avoid the halo artifacts and color distortion by the traditional center/surround-based Retinex enhancement methods, this paper proposed a Retinex method based on improved Mean Shift filtering. Firstly, low contrast image is decomposed into two parts: luminance and chrominance by principal component analysis (PCA). Improved Mean Shift filtering is introduced to get the enhancement of luminance adaptively. In addition, color image inpainting is performed independently according to Meylan method. Finally, image compensation is completed based on the global analysis. The experimental results show that the proposed method can effectively overcome the halo artifacts while maintaining color consistency when dealing with low contrast images, and speed up the process comparing with the similar adaptive methods.

**Keywords** Retinex, Image enhancement, Mean shift, Principal component analysis

人类视觉系统(human visual system, HVS)在光照不足的情况下依然可以通过自身一系列自适应感应机制,逼真还原出物体的色彩以及细节特征。相比较,相机等动态范围有限的图像采集设备并无类似于 HVS 复杂的自适应机制,在光照不足或者受照不均匀情况下,往往容易导致图像细节特征丢失,产生低对比度图像,难以满足人眼感知或后续图像处理的需要。传统图像增强方法主要对原图像进行全局变换处理,包括对数变换、伽玛变换以及 S 型函数变换等,处理速度较快,但在提高有用信息对比度的同时,也增强了无用信息的对比度,甚至造成局部细节的丢失。

近几年来许多学者提出了各种区域自适应的方法,取得了较好的增强效果。其中,基于人类视觉感知的 Retinex 理论<sup>[1]</sup>是一种最为经典的方法。常见的中心/环绕 Retinex 方法对彩色图像的 R、G、B 3 通道分别进行处理,一般步骤是首先从原图像中估计出光照,然后在对数域中减去光照得到增强的结果。但由于 3 通道之间较强的相关性以及光照估计采

用的全局滤波方法,导致其结果在细节增强以及颜色恢复方面存在不足。针对经典 Retinex 方法处理彩色图像的缺陷,本文提出一种改进的 Retinex 彩色图像增强算法,该方法采用主元分析法(principal component analysis, PCA),将图像分成亮度通道和色彩通道两个独立部分分别进行增强和恢复,PCA 可以保证亮度通道和色彩通道的正交性,因此可以忽略处理时两部分之间的相互影响。同时引入改进 Mean Shift 滤波算法来估计光照对亮度通道进行的补偿,在提高算法速度的同时,有效避免了“光晕现象”的产生。

## 1 Retinex 理论

Retinex 理论<sup>[1]</sup>最早于 1971 年由 Land 和 MCCANN 提出,在图像中选取任意一条路径,并累加路径中相邻亮点灰度值的差,然后求各路径累加差的平均值获得增强后的图像,并在此基础上 Land 提出了中心/环绕的 Retinex 方法<sup>[2]</sup>;此后,Jobson 等提出了单尺度 Retinex<sup>[3]</sup>(single scale Retinex,

本文受江苏省普通高校研究生科研创新计划资助项目(CXZZ12-0164),南京航空航天大学基本科研业务费青年科技创新基金(NS2013066),中央高校基本科研业务费专项资金(XAA13064)资助。

周 扬(1989—),男,硕士生,主要研究方向为机器视觉与图像处理, E-mail: bluefish0916@163.com; 孙 瑾(1978—),女,博士,副教授,硕士生导师,主要研究方向为机器视觉与图像处理、虚拟现实; 牛 犇(1982—),男,博士生,主要研究方向为图像处理、目标检测和识别。

SSR), 该算法可简述  $R(x, y) = \log S(x, y) - \log [F(x, y) * S(x, y)]$ , 其中  $*$  表示卷积运算,  $F(x, y)$  为 Gauss 核函数, Gauss 核半径越大, 图像动态范围压缩越明显, 相反, 图像对比度提高越明显。为取得两者之间的折中, Jobson 等又提出了多尺度 Retinex<sup>[4]</sup> (Multi-scale Retinex, MSR) 以及带色彩恢复的多尺度 Retinex (Multi-scale Retinex with Color Restoration, MSRCR), 其在一定程度上很好地完成了图像的动态范围压缩, 同时保持色感一致性。

中心/环绕 Retinex 方法基本假设是原始图像  $S$  是光照图像  $L$  和反射图像  $R$  的乘积, 即  $S=L \cdot R$ 。基于 Retinex 的图像增强的目的就是原始图像中估计出光照  $L$ , 从而分解出  $R$ 。消除光照不均的影响, 改善图像的视觉效果。传统算法存在相同的不足: “光晕现象”和色彩失真。

针对“光晕现象”, Elad<sup>[5]</sup> 在光照估计时引入双边滤波替代高斯滤波, 在噪声抑制及细节边缘都得到改善; Meylan<sup>[6]</sup> 等采用自适应滤波的方法, 在 Canny 算子检测出的强边缘处改变 Gauss 滤波器的核半径, 使获得的光照图像在明暗对比处保持间断, 避免光晕产生; 李武劲等<sup>[7]</sup> 改进传统的 Retinex 方法, 利用 MILP (光照最大值) 插值获得光照分量, 同时采用自适应噪声抑制的方法, 获得优化的反射分量。上述自适应平滑方法虽然增强效果有明显改善, 但是计算量较大, 程序运行较耗时。相比较, 许欣<sup>[8,9]</sup>、赵蓝飞<sup>[10]</sup> 等将 Mean Shift 滤波<sup>[11]</sup> 应用于 Retinex 理论, 在消除光晕效果的同时, 大大降低了耗时, 不足的是其在处理彩色图像时局部存在颜色失真。

为解决色彩失真问题, Sobol<sup>[12]</sup> 将 RGB 3 通道的最大值作为亮度, 采用 Retinex 增强, 并保持原 RGB 各分量间比例不变获得增强彩色图像; 秦旭佳<sup>[13]</sup> 等人将传统 RGB 空间上的多尺度 Retinex 算法转换到 HSV 颜色空间, 通过分析 HSV 颜色空间模型来增强模型中的  $V$  分量, 同时利用相关系数使  $S$  分量随着  $V$  分量的增强进行自适应调整, 使增强后的图像颜色得到保持; Meylan<sup>[6]</sup> 等提出了 PCA 变换方法, 保证获得的亮度和色彩两部分的正交性, 其效果优于前两种方法, 但其对于不同图像无法自适应调节, 导致部分图像增强效果并不理想。

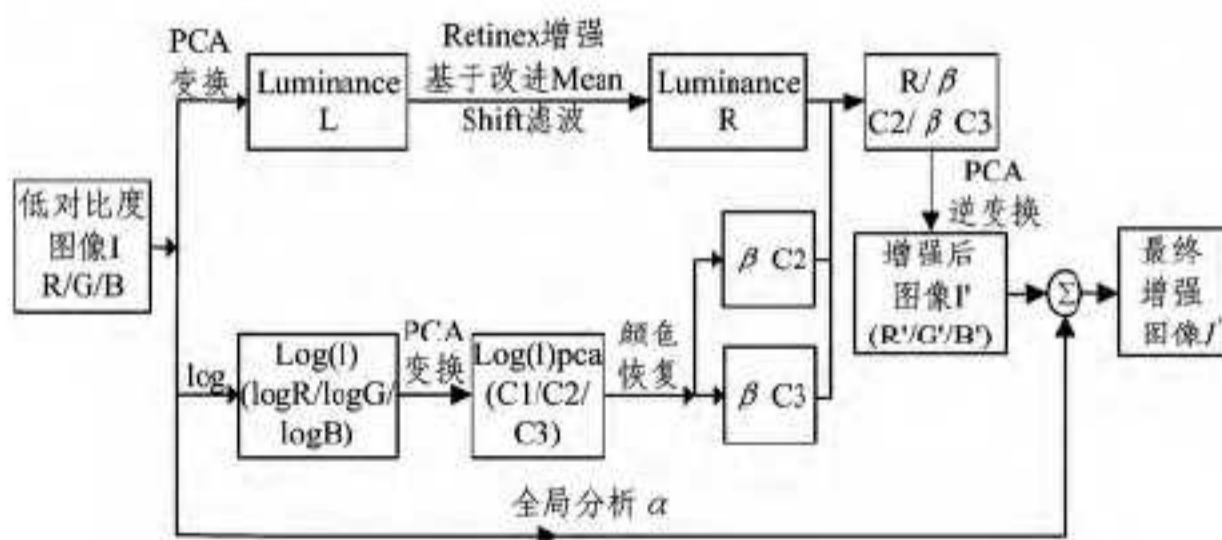


图1 本文算法流程图

## 2 基于改进的 Mean Shift 算法的彩色图像增强

针对上述方法的不足, 考虑在对亮度增强和色彩恢复的同时, 不同图像能够自适应地调整以达到最佳视觉效果, 本文提出基于改进的 Mean Shift 算法的彩色图像增强算法, 算法流程图如图 1 所示, 对低对比度图像  $I$  的亮度通道和色彩通道并行处理。亮度分量由  $I$  的主元成分确定, 采用基于改进 Mean Shift 滤波的 Retinex 增强; 色彩分量处理时, 将  $I$  在其对数域内进行 PCA 变换, 用亮度通道 Retinex 增强结果  $R$  替

换主元成分  $c_1$ , 同时为了补偿对数化造成饱和度等色彩信息的丢失, 对  $c_2, c_3$  进行增益补偿, 并将增益补偿结果进行 PCA 反变换回 RGB 空间, 并在全局分析的基础上利用增强图像  $I'$  对原图像  $I$  进行补偿得到最终的增强图像  $I''$ 。

### 2.1 消除“光晕现象”的改进 Mean Shift 滤波

Mean Shift 是一种基于非参数统计的算法<sup>[8-10]</sup>, 它利用核密度估计, 使得各点向密度较大的分布中心演化, 其在聚类、图像平滑、图像分割、跟踪和噪声抑制方面有着较为广泛的应用。

假设  $X$  是  $d$  维空间  $R^d$  的总体, 给定来自总体  $X$  的  $n$  个样本点  $x_i, i=1, 2, \dots, n$ , 则  $X$  的核密度估计定义为:

$$\hat{f}(x) = \frac{\sum_{i=1}^n K\left(\frac{x-x_i}{h}\right)w(x_i)}{h^d \sum_{i=1}^n w(x_i)} \quad (1)$$

其中,  $h$  表示核半径带宽,  $w(x_i)$  为样本点  $x_i$  对于点  $x$  的权重系数,  $K(x)$  为核函数, 且  $K(x) = k(\|x\|^2)$ , 通常  $K(x)$  可取为 Gauss 核。核密度估计的梯度可表示为:

$$\begin{aligned} \nabla \hat{f}(x) &\equiv \nabla \hat{f}(x) \\ &= \frac{2 \sum_{i=1}^n (x-x_i) k'\left(\left\|\frac{x_i-x}{h}\right\|^2\right)w(x_i)}{h^{d+2} \sum_{i=1}^n w(x_i)} \end{aligned} \quad (2)$$

令  $g(x) = -k'(x)$ , 其对应核函数为  $G(x) = g(\|x\|^2)$ , 则上式可以重写为:

$$\begin{aligned} \nabla \hat{f}(x) &= \frac{2}{h^2} \left[ \frac{\sum_{i=1}^n G\left(\frac{x_i-x}{h}\right)w(x_i)}{h^d \sum_{i=1}^n w(x_i)} \right] \cdot \\ &\quad \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (x_i-x)G\left(\frac{x_i-x}{h}\right)w(x_i)}{\sum_{i=1}^n G\left(\frac{x_i-x}{h}\right)w(x_i)} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

上式右边项, 即为扩展形式的 Mean Shift 向量, 记为  $M_h$ ,

$$M_h = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i-x)G\left(\frac{x_i-x}{h}\right)w(x_i)}{\sum_{i=1}^n G\left(\frac{x_i-x}{h}\right)w(x_i)} \quad (4)$$

即以  $G$  核为权重计算的平均值与  $x$  的差值。

将 Mean Shift 算法应用于图像平滑滤波时进行适当改进, 将图像看成二维网格点上的  $p$  维向量 ( $p=1$  表示灰度图像,  $p=3$  表示彩色图像), 通常统一考虑其空间信息和色彩信息, 组成  $p+2$  维向量  $x = (x^s, x^c)$ , 其中  $x^s$  表示空间坐标,  $x^c$  表示色彩信息。本文主要对亮度通道进行滤波增强, 仅仅考虑灰度信息作为样本点  $x$  的迭代 ( $p=1$ ), 而将空间相对坐标  $x_i^s - x^s$  以 Gauss 核为权重来计算其结果, 作为权重系数  $w(x_i)$ ,

$$w(x_i) = ce^{-\left(\frac{x_i^s - x^s}{h}\right)^2} \quad (5)$$

$c$  为归一化系数, 同时, 为了提高相似像素点所占权重, 引入一个增益系数  $\delta$  ( $\delta$  可取 100), 式 (4) 可重写成:

$$M_h = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i^s - x^s) G\left(\frac{\delta(x_i^s - x^s)}{h}\right)w(x_i)}{\sum_{i=1}^n G\left(\frac{\delta(x_i^s - x^s)}{h}\right)w(x_i)} \quad (6)$$

若已知核半径  $h$ , 可以确定权重系数  $w(x_i)$ , 对于给定的初始点  $x$ 、容许误差  $\epsilon$ , Mean Shift 算法循环执行下面 3 步, 直至结束条件满足:

(1) 计算  $M_h$ ;

(2) 将  $x_1 + M_h$  赋给  $x_1$ ;

(3) 如果  $\|M_h\| < \epsilon$ , 结束循环, 将  $x_1$  赋值给初始点  $x$ , 否则继续执行(1)。

较传统的 Mean Shift 算法, 改进的 Mean Shift 算法仅仅对像素点灰度值进行迭代, 所得结果为初始点  $x$ 、核半径  $h$  内所有样本点的加权平均值, 该平均值近似等于核半径  $h$  范围内样本点分布最多区域的值, 迭代结果与传统算法接近, 但算法复杂度要有所降低。图 2 为改进 Mean Shift 算法滤波估计的光照图与高斯滤波以及 Mean Shift 算法的光照图的对比 ( $h=6$ ), 可以看出本文算法估计的光照图像在明暗对比边缘依然清晰, 同时在细节处(如天空中云层)平滑效果优于 Mean Shift 算法。

为了直观比较上述各算法的平滑效果, 图 3 给出了原灰度图像局部区域(图 2(a)红色矩形框内)在上述各光照估计图中的三维曲面图, 可以看出, 虽然高斯滤波后曲面最为平滑, 但其与原图具有较大差异, Mean Shift 算法在保证曲面变化趋势不变的情况下, 在一定程度上平滑了原图中较为突出的毛刺部分, 而采用本文改进 Mean Shift 算法, 其曲面最为平滑, 平滑效果最优。

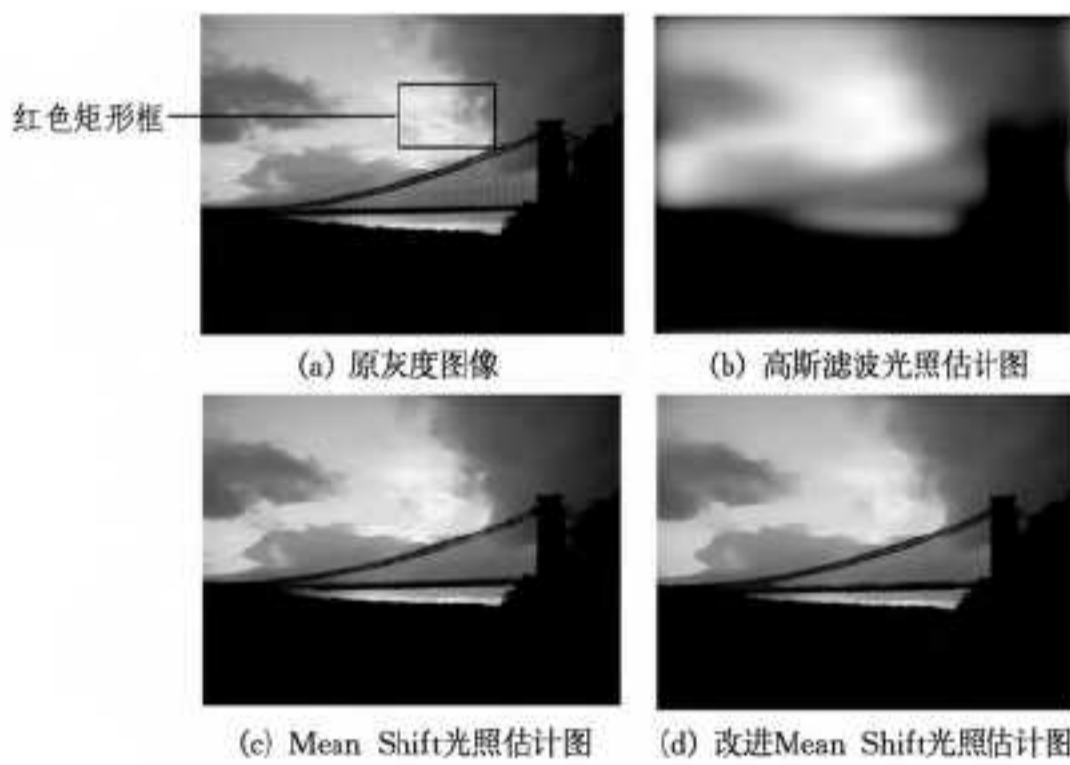


图 2 光照估计对比图

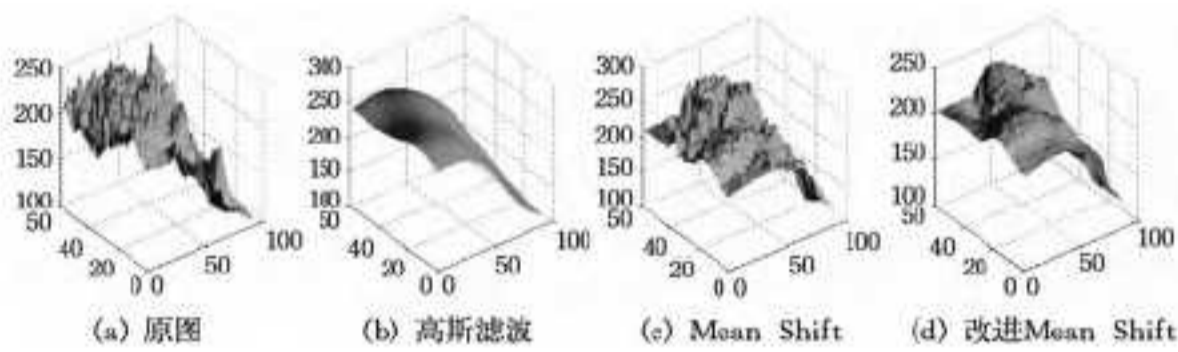


图 3 光照估计图局部平滑效果对比

## 2.2 基于 PCA 的色彩恢复及图像补偿

人类视觉系统 HVS 对光的感知是依靠视锥细胞完成的, 经后续神经阶段将光分成亮度和色彩两独立部分。鉴于此, 本文采用主元分析法(PCA)将原图像的 RGB 基础通道分解出 3 个基础成分  $c_1, c_2, c_3$ , 旨在通过 PCA 将彩色无关的分量提取出来。Buchsbaum 和 Gottshalk<sup>[12]</sup> 从信号处理的角度详细阐述了 PCA 和 HVS 的联系, 指出经 PCA 处理后可以将信号能量最大的值集中到主成分  $c_1$ ,  $c_1$  主要包含了非彩色的信息,  $c_2, c_3$  与  $c_1$  具有正交性, 代表饱和度等色彩信息。

低对比度图像  $I$  经 PCA 分解获得新的 3 个通道  $c_1, c_2, c_3$ 。采用基于中心/环绕的 Retinex 方法仅仅对亮度通道  $c_1$  进行区域自适应增强处理, 如下式:

$$\begin{cases} R(x, y) = \log(I(x, y)) - \log(L(x, y)) \\ L(x, y) = \text{mask}(I(x, y)) \\ \log(I(x, y)) = \frac{\log(\max(1, I(x, y) \times 100))}{\log(100)} \end{cases} \quad (8)$$

其中,  $I(x, y) \in [0, 1]$  代表亮度通道  $c_1$ , 对数处理后限定范围为  $[0, 1]$ ,  $\text{mask}(I(x, y))$  是利用本文的改进 Mean Shift 算法对  $I(x, y)$  进行滤波所得的结果, 通过实验发现, 改进 Mean Shift 算法中核半径  $h=6$  时取得较好的效果, 同时处理速度也较快。亮度通道  $c_1$  经增强后其结果  $R(x, y)$  往往较亮, 如果直接反变换回 RGB 通道, 最终增强图像视觉效果往往不佳, 如图 3(b) 所示, 增强图像饱和度不足, 整体颜色较黯淡, 为此, 本文进行以下两方面处理:

### (1) 色彩恢复

由图 1 算法流程图可见, 将原 RGB 图像  $I$  对数化  $\log(I)$ , 并进行 PCA 变换得到  $\log(I)_{PCA}$ , 将主成分亮度信息用上文获得的增强结果  $R(x, y)$  替代, 同时为了补偿对数化造成饱和度等色彩信息的丢失, 本文采用 Meylan 的方法, 对彩色分量通道进行增益, 取常数  $\beta=1.5$  时获得较好补偿结果。最后, 将经色彩恢复处理的  $\log(I)_{PCA}$  反变换回 RGB 空间得到增强的彩色图像  $I'$ 。

### (2) 图像补偿

经色彩恢复后图像  $I'$  色彩的饱和度得到提升, 为了使增强后的图像视觉效果更佳, 本文将增强结果  $I'$  按照式(9)进行图像补偿:

$$I'' = (1 - \alpha) \times I' + \alpha \times I \quad (9)$$

参数  $\alpha$  是由对图像的明暗程度决定的,  $\alpha$  的取值由以下关系确定:

$$\begin{cases} \rho = \max(1, \frac{\sum \log(I(x, y))}{\log(x, y)}) \\ \alpha = \max(0, 25, \frac{\log(\rho)}{\log(10)}) \end{cases} \quad (10)$$

最终可获得经色彩恢复和图像补偿后增强图像  $I''$ 。图 4 显示了补偿后图像明暗程度及色彩增强效果。



图 4 色彩恢复和图像补偿处理比较

## 3 实验及结果分析

为验证本文方法的有效性, 对 4 幅彩色图像 Girl、Man、Bike、Build 进行了增强, 图 5 显示了处理效果, 其中第一行为原彩色图像, 第二行为增强后图像。可以看出, 本文方法在抑制“光晕现象”的同时对隐藏在阴影内的细节提升明显, 如图 5(a) 中阴影处车窗内倒影、图 5(b) 中室内布局、图 5(c) 中商场入口以及图 5(d) 中建筑物墙上的文字, 并且增强后图像颜色一致性保持较好, 并没有出现失真的情况。



图 5 本文方法增强结果

图 6 显示本文方法与 MSRCR、Meylan 的方法以及文献

[9]中的 Mean Shift 方法对 Man 图像处理的对比实验结果。可以发现,MSRCR 方法增强后的图像被蒙上一层白雾,造成视觉效果不佳;文献[9]中 Mean Shift 的方法整体较暗,局部颜色饱和度不足,如人脸皮肤以及桌面竖立的调色板等;Meylan 方法与本文方法增强结果较为接近,增强后的图像色彩饱和度较好。同时从信息熵和对比度两个评价指标对上述各算法进行对比,如表 1 所列,Meylan 方法与本文方法在信息熵的提高和对比度的增强方面具有明显优势。

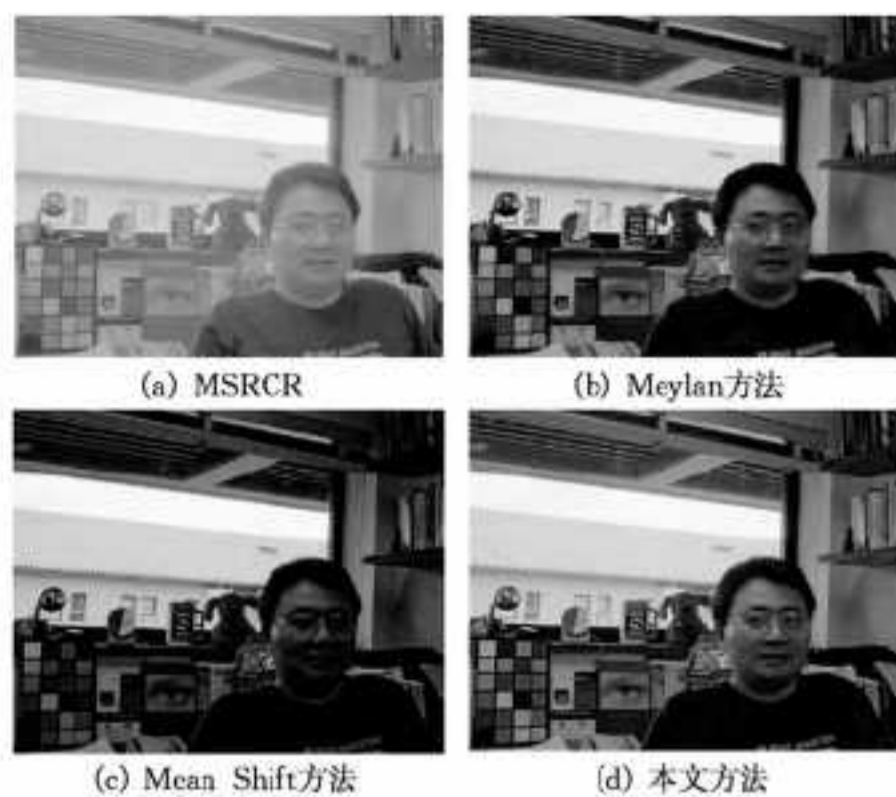


图 6 Man 图像几种增强结果对比

表 1 Man 图像几种增强结果评价指标

评价指标	原图	MSRCR	Meylan	Mean Shift	本文方法
信息熵	6.2248	6.9492	7.5485	7.4301	7.5495
对比度	62.5870	59.9689	169.8400	160.8574	176.2316

两种方法的关键都在于采用自适应平滑滤波方法对光照图像进行估计,但是 Meylan 方法采用逐点计算,且计算复杂度较高,处理时间较慢,表 2 显示了 4 种算法的运行速度,所有方法均使用 Intel Core2 2.00GHz,2GB 内存的 PC,在 Windows XP 操作系统下用 Matlab 7.1 编程实现,不难看出,本文算法相对 Meylan 方法运行时间显著提高。

表 2 3 种方法运行时间对比(单位:s)

图像(500×400)	MSRCR	Meylan	Mean Shift	本文方法
Girl	0.62	218.23	45.00	16.13
Man	0.77	273.87	46.96	11.38
Bike	0.70	251.28	47.31	10.41
Build	0.76	250.22	48.12	10.56

结束语 针对现有图像增强算法的不足,本文提出一种基于改进 Mean Shift 的 Retinex 理论的彩色图像增强方法,即采用主元分析法将 RGB 空间分解为亮度和色彩两独立部分,亮度通道利用改进的 Mean Shift 滤波平滑图像用于光照补偿,同时对色彩分量进行恢复。实验证明,本文方法在对图

像细节增强及色彩恢复方面显示了较好的效果,同时与现有自适应增强算法相比,处理速度显著增强。

## 参考文献

- [1] Land E H, Meccann J. Lightness and Retinex theory [J]. J Opt Soc Amer, 1971, 61(1): 1-11
- [2] Land E H. An alternative technique for the computation of the designator in the Retinex theory of color vision [J]. Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America, 1986, 83(10): 3078-3080
- [3] Jobson D J, Rahman Z, Woodell G A. Properties and performance of a center/surround retinex [J]. IEEE Tran. on Image Processing, 1997, 6(3): 451-462
- [4] Jobson D J, Rahman Z, Woodell G A. A Multiscale Retinex for bridging the gap between color images and the human observation of scenes [J]. IEEE Trans. on Image Processing, 1997, 6(7): 965-976
- [5] Elad M. Retinex by two bilateral filters [C]//5th International Conference on Scale-Space and PDE Methods in Computer Vision. Hofgeismar; Springer, 2005: 217-229
- [6] Meylan L, Susstrunk S. High dynamic range image rendering with a retinex-based adaptive filter [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(9): 2820-2830
- [7] Li Wu-jing, Gu Bo, Huang Jiang-tao, et al. Novel Retinex algorithm by interpolation and adaptive noise suppression [J]. J. Cent. South Univ., 2012, 19: 2541-2547
- [8] 许欣, 陈强, 王平安, 等. 消除光晕现象的快速 Retinex 图像增强 [J]. 计算机辅助设计与图学学报, 2008, 20(10): 1325-1331
- [9] 许欣, 陈强, 王平安, 等. 快速 Retinex 彩色图像增强 [J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(5): 4-6
- [10] 赵蓝飞, 席志红. 基于 Mean Shift 的光晕抑制算法 [J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(7): 1558-1563
- [11] Han H, Sohn K. Automatic Illumination and Color Compensation Using Mean Shift and Sigma Filter [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2009, 55(3): 978-986
- [12] Sobol R. Improving the Retinex algorithm for rendering wide dynamic range photographs [J]. Electron. Imag., 2004, 13(1): 65-74
- [13] 秦旭佳, 王慧玲, 杜轶诚, 等. HSV 色彩空间的 Retinex 结构光图像增强算法 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2013, 25(4): 488-493
- [14] Buchsbaum G, Gottschalk A. Trichromacy, opponent colours coding and optimum colour information transmission in the retina [J]. Roy. Soc. Lond. B, Biol. Sci., 1983, 220: 89-113
- [12] 杨幸芳, 等. 一种提高 SIFT 特征匹配效率的方法 [J]. 中国机械工程, 2012, 23(11): 1297-1301
- [13] 石钊铭, 耿伯英, 董银文. 基于改进 SIFT 的航拍图像快速匹配方法 [J]. 指挥控制与仿真, 2013, 35(1): 106-110
- [14] 刘立, 等. 采用简化 SIFT 算法实现快速图像匹配 [J]. 红外与激光工程, 2008, 37(1): 181-184
- [15] 孙韬, 方俊永, 刘学, 等. 基于 SIFT 特征匹配的全自动辐射归一化算法 [J]. 红外与毫米波报, 2012, 31(4): 355-359

(上接第 128 页)

- [8] 张羽, 丹朱, 王玉良. 一种改进的快速 SIFT 特征匹配算法 [J]. 微计算机信息, 2008, 24(11): 220-222
- [9] 高健, 等. 一种简化的 SIFT 图像特征点提取算法 [J]. 计算机应用研究, 2008, 25(7): 2213-2215, 2222
- [10] 赵启兵, 王养柱, 胡永浩. 基于改进 SIFT 算法的无人机遥感影像匹配 [J]. 电光与控制, 2012, 19(3): 36-39, 55
- [11] 祁燕, 王琰, 王明宇. 改进的 SIFT 特征图像配准算法 [J]. 沈阳理工大学学报, 2012, 34(4): 6-10