

·信号与信息处理·

## 一种基于累积分布的低照度彩色图像增强算法

冯清枝<sup>1</sup>, 虎添翼<sup>2</sup>

(1. 中国刑事警察学院 声像资料检验技术系, 沈阳 110854; 2. 昆山市公安局 青阳派出所, 江苏 昆山 215300)

**摘要:**为了解决低照度环境引起的彩色图像退化问题,提出一种新的彩色图像增强算法。首先在YUV色彩空间下采用彩色双边滤波估计照度分量;然后在提取反射分量时,构造一个与累积分布相关的对比度调节函数,自适应地增强图像的细节信息;最后采用线性彩色恢复算法恢复增强图像的色彩信息。实验结果表明,该算法能够明显地提高低照度彩色图像的整体视觉效果,细节鲜明突出,色彩真实自然。

**关键词:**图像增强;Retinex理论;双边滤波;累积分布函数

中图分类号:TP391.41

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2017)-05-0057-05

## A Novel Algorithm Based on Cumulative Distribution for Low Illumination Color Image Enhancement

FENG Qing-zhi<sup>1</sup>, HU Tian-yi<sup>2</sup>

(1. Department of Audio and Visual Material Examination Technology, Criminal Investigation Police University of China, Shenyang 110854, China;

2. Qinyang Police Station, Kunshan Police Bureau, Kunshan 215300, China)

**Abstract:** To resolve the degradation of color images caused by low illumination condition, a novel algorithm to improve the visibility of low illumination color images is proposed. At first, the illumination component is estimated using the color-bilateral filtering in YUV color space. And then, while the reflectance component being calculated, a contrast regulation function based on cumulative distribution is introduced to adaptively emphasize minute features of images. At last, a linear color restoration process is utilized to determine color values of the enhanced image. Experimental results show that the proposed algorithm is more effective and practicable, and the enhanced image can achieve an excellent global visual effect with clear details and natural colors.

**Key words:** image enhancement; Retinex theory; bilateral filtering; cumulative distribution function

在光线昏暗的低照度环境下的现场影像质量退化,给影像分析等工作带来了严峻挑战。低照度彩色图像的退化表现在:(1)画面存在大量低光区,亮度及对比度较低,细节损失过多;(2)在人工光源照明下,画面又存在部分高光区,亮度分布不均匀,动态范围跨度大,局部对比度低;(3)画面色调偏移,饱和度低,色彩失真,且附有噪声干扰。因此,

低照度彩色图像增强成为近年来研究的一个热点问题<sup>[1]</sup>。

传统的图像增强方法多数是针对灰度图像提出的,包括基于空间域的灰度映射、直方图均衡化等,基于频率域的同态滤波、双边滤波等,还有基于小波域的图像增强,基于Retinex理论的图像增强,基于偏微分方程的图像增强等。不同的方法有着各

收稿日期:2017-07-29

基金项目:国家自然科学基金(61603415)

作者简介:冯清枝(1969-),男,辽宁沈阳人,硕士,中国刑事警察学院声像资料检验技术系副教授,主要研究方向包括刑事影像技术、数字信号处理等。

自独特的性能,能够显著地改善图像的视觉效果<sup>[2]</sup>。彩色图像具有亮度、色调和饱和度等信息,它的处理远比灰度图像复杂,因此,灰度图像增强方法一般不能直接应用于彩色图像。目前,针对彩色图像增强常用的是基于色彩空间转换的增强方法。首先将彩色图像由RGB空间转换到其他色彩空间,如YUV空间,这样彩色图像被分解为亮度分量和色度分量,然后利用灰度图像增强方法调整亮度分量,最后在保持色调不变的前提下,重新转换到RGB空间实现彩色图像增强。

低照度彩色图像增强的目的是调整亮度动态范围,突出低光区的影调层次,恢复自然色彩,抑制噪声干扰,尽可能地提高画面清晰度和色彩逼真度。鉴于此,文中提出一种新的低照度彩色图像增强算法。该算法在Retinex理论上,采用彩色双边滤波对亮度图像进行卷积运算,准确地估计照度分量,消除光照变化对反射分量的影响;然后结合亮度图像的累积分布函数,构造一个对比度调节函数,自适应地增强低光区的细节信息;最后根据亮度增益,利用线性变换恢复色彩信息,重建彩色图像。

## 1 色彩空间转换

人类对于彩色的感知是一种复杂的生理和心理现象,目前对其机理还没有完全认知。这样就存在多种彩色描述方法,不同的方法对应于不同的色彩空间。通常选择三个相对独立的属性来描述复杂的彩色变化,用以表征不同属性的三个变量综合作用,构成一个三维的数值集合,即色彩空间。不同的色彩空间只是从不同的角度来度量同一个彩色对象。

### 1.1 RGB色彩空间

电磁波谱范围很大,其中波长为380~780 nm的电磁波能够被人眼所感知,并产生亮度和色度的综合感受。1931年,国际照明委员会(CIE)规定,分别选用水银光谱中波长为700 nm、546.1 nm、435.8 nm的单色谱线作为红(R)、绿(G)、蓝(B)三基色。根据三基色原理,任何彩色可以看作由不同数量的红、绿、蓝三基色混合而成。RGB色彩空间是在三基色理论上开发的相加混合色彩空间,也是彩色图像处理中最基本、最常用的色彩模型。

### 1.2 HSI色彩空间

从人类视觉系统出发,采用色调(H)、饱和度(S)和亮度(I)来描述彩色。色调反映彩色的颜色类别,如红色、绿色、蓝色等,色调感受是由入射到人眼的光谱成分决定的;饱和度反映彩色的浓淡程度,对于同一颜色而言,饱和度越高,颜色越浓,越鲜艳;亮度反映彩色的明亮程度,亮度感受是由入射到人眼的光通量决定的。色调与饱和度合称为色度,既说明彩色的颜色类别,又说明彩色的浓淡程度。HSI色彩空间是一种直观的色彩模型,比其他色彩空间更符合人的视觉特性,能将彩色图像的亮度信息和色度信息分离,更适于彩色图像处理和识别。

### 1.3 YUV色彩空间

为了实现与黑白电视兼容互收,现代彩色电视系统需要传输一个反映图像亮度信息的亮度信号Y,并且其特性应与黑白电视信号的相同,与此同时,还需要传输两个反映图像色度信息的色差信号R-Y、B-Y。所谓色差信号是由基色信号和亮度信号之差组成的信号,目的是改善基色信号的信噪比。由于色差信号是叠加在亮度信号上传输的,为了避免信号幅值超出亮度信号的动态范围,需要对色差信号进行适当的压缩。U、V分别是B-Y、R-Y按照不同比例压缩而成的,YUV色彩空间则是采用亮度(Y)和色差(U、V)建立的色彩模型。

### 1.4 色彩空间转换

大多数图像处理是基于RGB色彩模型。根据色彩恒常性理论,彩色图像中的每个像素具有唯一的绝对色彩,即每个像素的R、G、B三基色分量的比例是唯一的。在彩色图像增强时,三基色分量相关性较高,若对三基色分量进行分别处理则难以保证图像的色彩恒常性。而YUV色彩模型具有分离亮度信息和色度信息的特点,将彩色图像由RGB空间转换到YUV空间,单独对亮度分量进行增强处理将不会破坏彩色图像的色度信息,并且运算效率高。

RGB色彩空间与YUV色彩空间的相互转换可由矩阵运算公式描述为

$$\begin{bmatrix} Y \\ U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ -0.169 & -0.331 & 0.500 \\ 0.500 & -0.418 & -0.082 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (1)$$

## 2 Retinex理论

色彩恒常性是指人类视觉系统具有在不同光照条件下识别物体真实色彩的自适应特性,即当光照条件发生变化时,人眼对色彩的感知仍能在一定程度上保持相对不变。与人类视觉系统不同,成像系统不能对不同光照条件做出相应的光谱响应,不可避免地造成图像色彩失真。20世纪70年代,美国物理学家EdwinLand首次提出Retinex理论,也称为视网膜大脑皮层理论。该理论描述了人类视觉系统感知物体色彩的调节机制,解释了人眼对不同光谱和不同强度的光源照射下同一物体的色彩感知相对恒定的现象<sup>[3]</sup>。Retinex理论认为场景图像是由环境的照射光和物体的反射光共同作用的结果,即场景图像 $I$ 是由低频的照度分量 $L$ 和高频的反射分量 $R$ 组成的,用公式表示为

$$I(x,y) = L(x,y) \cdot R(x,y) \quad (2)$$

其中,照度分量决定场景图像的动态范围;反射分量决定场景图像的内在性质。基于Retinex理论的图像增强实质是估计并消除照度分量对反射分量的影响,从场景图像中提取反射分量,以获取物体的本质特征。根据照度分量估计方法的不同,衍生出不同形式的基于Retinex理论的图像增强算法,从任意路径算法、泊松方程算法等发展到单尺度Retinex算法、多尺度Retinex算法等。

基于Retinex理论的图像增强算法的一般表达式为

$$R_c(x,y) = \sum_{i=1}^n \alpha_i \{ \lg I_c(x,y) - \lg \bar{L}_{c,i}(x,y) \} \quad (3)$$

式中, $x,y$ 为像素坐标; $I_c$ 为场景图像中某一基色分量, $c \in \{R,G,B\}$ ;  $R_c$ 为该基色分量的增强图像; $\bar{L}_{c,i}$ 为 $I_c$ 在第 $i$ 尺度下的照度分量估计,可由高斯函数 $W_i$ 与 $I_c$ 的卷积运算获得,即 $\bar{L}_{c,i}(x,y) = W_i(x,y) \otimes I_c(x,y)$ ;高斯函数的标准差称为尺度参数,其大小影响着照度分量的估计结果; $\alpha_i$ 为第 $i$ 尺度的权重系数,且满足 $\sum \alpha_i = 1$ ;  $n$ 为尺度数目。

Retinex算法在压缩动态范围、突出细节特征以及恢复真实色彩等方面具有较好的效果,同时也存在以下不足:(1)Retinex理论是基于灰度假设提出的,应用于彩色图像增强时,一般是对三基色分量进行分别处理,容易造成三基色增益比例不同而引起色彩失真;(2)采用高斯函数估计照度分量时,仅

是根据像素位置进行计算,而忽略像素数值变化的影响,导致光照突变区域的误差偏大而出现光晕现象;(3)在对数域内直接将场景图像减去照度分量,可以压缩图像的动态范围,但是对图像低光区细节的增强效果不佳<sup>[4]</sup>。

## 3 低照度彩色图像增强算法

针对Retinex算法存在的不足,文中提出的低照度彩色图像增强算法在照度分量估计、反射分量增强以及色彩信息恢复等方面采取了相应的改进措施。

### 3.1 照度分量估计

双边滤波是一种具有保持边缘特性的图像滤波方法,由于巧妙地利用中心像素与邻域像素的空间邻近性和数值的相似性,相比于高斯滤波,更能准确地估计照度分量。双边滤波是通过在卷积运算过程中组合空域高斯函数和值域高斯函数来实现的,利用双边滤波估计照度分量的数学表达式为

$$\bar{L}(x,y) = \sum_{(\xi,\eta) \in \Omega} W_s W_v Y(\xi,\eta) / \sum_{(\xi,\eta) \in \Omega} W_s W_v \quad (4)$$

式中, $\Omega$ 表示以 $(x,y)$ 为中心的邻域内所有像素集合; $Y$ 为场景图像的亮度分量; $W_s$ 和 $W_v$ 分别为空域高斯函数和值域高斯函数,即

$$\begin{aligned} W_s(x,y; \xi,\eta) &= \exp \left\{ -\frac{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2}{2\sigma_s^2} \right\} \\ W_v(x,y; \xi,\eta) &= \exp \left\{ -\frac{[Y(x,y) - Y(\xi,\eta)]^2}{2\sigma_v^2} \right\} \end{aligned} \quad (5)$$

空域高斯函数的标准差 $\sigma_s$ 称为距离差尺度,值域高斯函数的标准差 $\sigma_v$ 称为亮度差尺度。可见,双边滤波是一种复合滤波,在卷积运算中,针对不同区域、不同特征的像素赋予不同的权重系数,较好地预测了场景图像中光照突变的情况,在一定程度上克服光晕现象。

对于灰度图像,人眼主要是利用像素之间的亮度差异来感知图像结构特征;而对于彩色图像,人眼则是利用像素之间的亮度、色度差异来感知图像结构特征。比如,当图像某一区域的亮度感受相同时,单纯依靠亮度信息难以辨别边缘特征,此时需要借助色调、饱和度等色度感受加以区分,并且人眼对色调变化更为敏感。为了提高双边滤波的性能,引入色度信息,通过构造彩色双边滤波来估计



照度分量,具体形式为

$$\bar{L}(x,y) = \frac{\sum_{(\xi,\eta) \in \Omega} W_s W_c Y(\xi,\eta)}{\sum_{(\xi,\eta) \in \Omega} W_s W_c} \quad (6)$$

式中,  $W_c$  为综合亮度、色度信息的值域高斯函数,即

$$W_c(x,y; \xi,\eta) = \exp\left\{-\frac{[Y(x,y) - Y(\xi,\eta)]^2 + [U(x,y) - U(\xi,\eta)]^2 + [V(x,y) - V(\xi,\eta)]^2}{2\sigma_c^2}\right\} \quad (7)$$

式中,  $\sigma_c$  为对应的尺度参数;  $Y$ 、 $U$  和  $V$  分别为由式(1)计算得到的亮度和色差分量。

### 3.2 反射分量增强

Retinex 算法采用对数变换压缩图像动态范围的同时,也弱化图像局部细节的显示效果。此外,如果从场景图像中完全消除照度分量,也会出现图像不自然的现象。为此,引入一个与亮度相关的对比度调节函数,目的是通过调整照度分量的权重,自适应地增强反射分量,从而提高图像的局部对比度,突出低光区的细节特征。结合亮度图像的累积分布函数(cumulative distribution function, CDF)<sup>[5]</sup>,构造如下的对比度调节函数为

$$\beta(x,y) = 1 - CDF[Y(x,y)] \quad (8)$$

增强后的反射分量为

$$R(x,y) = \lg Y(x,y) - \beta(x,y) \lg \bar{L}(x,y) \quad (9)$$

累积分布函数反映图像亮度分布的统计特征,这样,对比度调节函数  $\beta(x,y)$  可以针对图像不同的亮度区域,动态调整照度分量对反射分量的影响,侧重提高低光区的亮度和对比度。

### 3.3 彩色恢复

由式(9)计算得到的  $R(x,y)$  不能直接显示或后续处理,需要进行归一化调整,将  $R(x,y)$  的像素数值由  $[R_{\min}, R_{\max}]$  线性拉伸到  $[0, 255]$ ,即

$$Y(x,y) = 255 \times \frac{R(x,y) - R_{\min}}{R_{\max} - R_{\min}} \quad (10)$$

式中,  $Y(x,y)$  即为增强图像的亮度分量。为了避免色调偏移,采用如下的线性彩色恢复算法恢复色彩信息<sup>[6]</sup>,如下式

$$I'_c(x,y) = \frac{1}{2} \left\{ \begin{array}{l} \frac{Y(x,y)}{Y(x,y)} [I_c(x,y) + Y(x,y)] + \\ I_c(x,y) - Y(x,y) \end{array} \right\}, c \in \{R, G, B\} \quad (11)$$

式中,  $I_c$  为场景图像中某一基色分量;  $I'_c$  为增强图像中对应的基色分量。

## 4 实验结果及分析

在 MATLAB7.0 实验环境下,使用文中算法,分别对低照度环境下的静态图片和动态视频图像进行增强处理,验证算法的实效性和普适性。图1为低照度彩色图像增强算法分析。



图1 低照度彩色图像增强算法分析

图1a是在室内暗环境下拍摄的低对比度彩色图片,以此分析文中算法的增强效果。图1b是采用高斯滤波获得的照度图像。可以看出,高斯滤波对光照突变的区域估计不准确,边缘细节模糊;图1c是采用彩色双边滤波获得的照度图像,由于综合了亮度、色度信息,对光照变化情况估计准确,边缘清晰,但仍对远景低光区估计不准确,体现在增强图像的低光区细节不分明。图1d是增强处理后的彩色图片,与图1a相比,可以看出,画面亮度和对比度明显提高,远景花卉轮廓清晰,色彩鲜明,但花朵细节不明晰;前景色板明亮,色彩真实。通过实验发现,对于彩色双边滤波参数的选择,滤波窗口  $\Omega=45$ , 尺度参数  $\sigma_s=4$ ,  $\sigma_c=0.05$  较为合适。

图2是夜晚彩色图像增强效果对比图。图2a是选取监控系统记录的夜晚环境下的彩色视频图像作为实验检材,将文中算法与自适应直方图均衡化、多尺度 Retinex 算法进行对比实验。图2b、图2c和图2d分别是自适应直方图均衡化、多尺度 Retinex 以及文中算法的处理结果。通过比较四幅图像

的视觉效果,可以看出,原始彩色图像是由夜晚照度低等因素造成的退化图像,画面晦暗,对比度低,远景细节不清晰,色彩暗淡;经过自适应直方图均衡化处理的图像亮度和对比度相对提高,但是低光区增强效果不够理想;经过多尺度 Retinex 处理的图像整体亮度和对比度明显提高,但是天空、绿地存在块状效应,色调略有偏移;文中算法采用彩色双边滤波准确地估计照度分量,对远景细节具有较好的表现能力,画面清晰自然,色彩鲜艳逼真,整体感强,提高了夜晚低照度彩色图像的视觉质量。

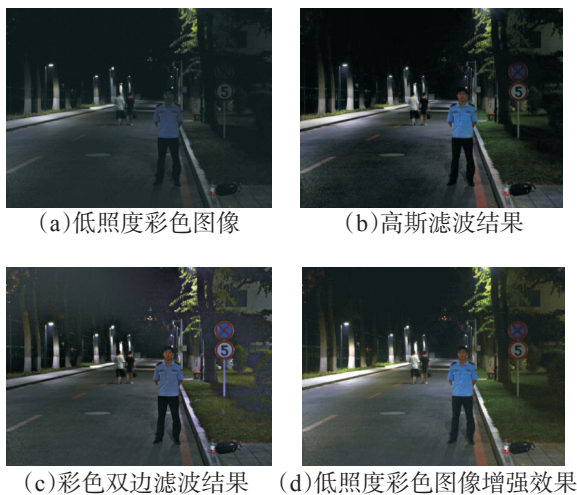


图2 夜晚彩色图像增强效果对比

## 5 结 论

提出一种基于累积分布的低照度彩色图像增强算法。算法的创新之处在于采用彩色双边滤波估计照度分量,克服了 Retinex 算法存在的不足;结合亮度图像的累积分布,构造对比度调节函数,增强了低光区细节信息;采用线性彩色恢复算法,保

持了图像色彩的协调性。实验结果表明,文中算法既能提高场景图像的层次感和清晰度,又能改善场景图像的亮度、对比度、色彩等视觉效果,具有良好的综合性能。后续工作将进一步探讨参数优选、算法简化等问题,以满足实时应用的技术要求。

## 参考文献

- [1] 禹晶,李大鹏,廖庆敏. 基于颜色恒常性的低照度图像视见度增强[J]. 自动化学报, 2011, 37(8).
- [2] 冯清枝. 基于小波融合的视频图像增强方法[J]. 光电技术应用, 2016, 31(2): 47-50.
- [3] LAND E H. The Retinex theory of color vision[J]. Scientific American, 1977, 237(6).
- [4] NIKOLA B, SVEN L. Light random sprays Retinex: exploiting the noisy illumination estimation[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2013, 20(12).
- [5] HUANG Shih-chia, CHENG Fan-chieh, CHIU Yi-sheng. Efficient contrast enhancement using adaptive gamma correction with weighting distribution[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2013, 22(3).
- [6] Sakaue S, Nakayama M, Tamura A, et al. Adaptive gamma processing of the video cameras for the expansion of the dynamic range[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 1995, 41(3).
- [7] 王易循,赵勋杰. 基于K均值聚类分割彩色图像算法的改进[J]. 计算机应用与软件, 2010, 27(8): 127-130.
- [8] 方思敏,王亚刚. 一种嵌入式图像算法的加速优化方法[J]. 电子科技, 2015, 28(12): 26-28.
- [9] 万智萍. 结合视觉性与灰度拉伸的直方图均衡化红外图像算法[J]. 计算机工程与设计, 2016, 37(3): 714-719.
- [10] 周啸,史瑞芝,孙冰,等. 一种基于纹理对称变换的蔓延生长半色调图像算法[J]. 信息工程大学学报, 2015, 16(5): 602-607.

## 版 权 声 明

本刊已成为《中国核心期刊(遴选)数据库》收录期刊、《中文科技期刊数据库》收录期刊、《中国期刊全文数据库》全文收录期刊、《中国学术期刊综合评价数据库》统计源期刊、美国《乌利希期刊指南》收录期刊,并加入中国光学期刊网,所刊载的文章在国内外数据库检索机构及网站(包括纸板、光盘版、网络版)报道时,不再征求作者意见。稿件刊登录用后作者著作权使用费与本刊稿酬一次性付给,并赠送当期样刊两份。