

# 结合人眼视觉特性和模糊集理论的彩色图像增强

云海姣,董玉冰,王晓丽

(长春大学电子信息工程学院,吉林 长春 130022)

**[摘要]** 针对不均匀光照或低照度的彩色图像对比度低的问题,提出一种结合人眼视觉特性的全局亮度调节和局部对比度增强的方法.首先,将已有的 RGB 图像转换到 HSV 彩色空间,根据人眼视觉特性,自适应生成算法参数,非线性调节图像全局亮度和动态范围,提高图像亮度的整体水平;然后,结合模糊集理论增强算法特性,建立局部对比度隶属度函数,非线性调整图像的局部对比度细节信息;最后,将增强后的图像由 HSV 空间转换回 RGB 空间,完成彩色空间恢复.实验表明,该方法能够有效地增强低照度图像的全局亮度和局部对比度,提升低照度图像的视见度.

**[关键词]** 图像增强,人眼视觉特性,模糊集理论,全局亮度调节,局部对比度增强

**[中图分类号]** TP751.1 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2018)03-0025-08

## Color Image Enhancement Combining Human Visual Characteristics with Fuzzy Set Theory

Yun Haijiao, Dong Yubing, Wang Xiaoli

(School of Electronic Information Engineering, Changchun University, Changchun 130022, China)

**Abstract:** Aiming at low illumination and contrast of color images, we propose a novel global brightness modulation and local contrast adaptive enhancement method combined with human visual characteristics and fuzzy set theory. Firstly, through nonlinear global brightness mapping model to adjust the dynamic range of the images, the color images transform from RGB color space into HSV color space, which improves the overall level of image brightness. Next, according to fuzzy set theory, it establishes membership function to adjust the local contrast of image details nonlinearly. Finally, the enhanced images are transformed from HSV color space into RGB color space, restoring color space. Experimental results show that this algorithm has an excellent enhancement effect, which can enhance the global brightness and local contrast, and improve visibility of low illumination image.

**Key words:** image enhancement, human visual characteristics, fuzzy set theory, global brightness modulation, local contrast enhancement

随着信息科学技术的迅速发展,数字图像信息处理技术越来越广泛地应用于军事、医疗和多媒体技术等领域.图像增强技术是数字图像处理中不可或缺的部分,是改善图像质量和视觉效果的重要手段.目前,由于采集设备在工作过程中受到相机的散焦、光照不均匀及大气干扰等因素影响,彩色图像往往会出现信噪比低、颜色不饱和、对比度低等问题;而对比度低是影响彩色图像视觉效果质量最关键的因素之一.因此,为了更好地展现场景信息,突出图像细节特征内容,增强这类低照度彩色图像的视觉效果尤为关键.传统的图像对比度增强方法可主要分为两类<sup>[1-4]</sup>:

(1)全局方法:包括对数变换、Gamma 校正、分段线性变换、直方图均衡化(histogram equalization, HE)等.这类方法一般都是将全局灰度进行简单的一对一映射来改变像素点的灰度值,并未具体考虑邻域像素间的空间亮度差异.因此,利用全局方法调整低照度图像的亮度时,虽能对图像的全局亮度进行调节,但往往会忽略对图像的局部细节特征进行增强,最终导致图像特征出现模糊现象.

收稿日期:2018-04-18.

基金项目:国家自然科学基金青年基金(61405191)、教育部春晖计划(Z2017025).

通讯联系人:云海姣,博士,讲师,研究方向:数字图像处理. E-mail:yunhj@ccu.edu.cn

(2)局部方法:主要是利用局部特征,在增强全局对比度的同时增强局部对比度,包括带色彩恢复的多尺度 Retinex(multi-scale Retinex with color restoration, MSRCR)方法<sup>[5-6]</sup>和梯度域方法<sup>[7]</sup>等.其中,基于 Retinex 理论的增强方法受到广泛的关注,文献[5]利用 Retinex 理论初步调节全局图像的动态范围,再通过多尺度调节图像的局部特征细节;文献[7]提出依据人眼视觉感知特性,非线性地对图像的局部梯度场进行增强.而这些方法会使增强后的图像过亮,出现灰化现象,亮区域细节被削弱,暗区域细节得不到有效的增强.为了更好地解决彩色图像的增强效果,研究者依据图像灰度级的分布特点提出灰度级组合法(gray level grouping, GLG)<sup>[8]</sup>,并将其应用到增强彩色图像的亮度分量,图像处理效果较好,但该方法存在过度增强和算法复杂度高的缺点.20 世纪 80 年代中期 Pal 等<sup>[9]</sup>首次将模糊集理论应用于图像增强领域,获得了突破性成果.随后,研究者通过对模糊集理论的深入研究,结合人眼视觉特性和图像的邻域统计信息、模糊信息引入模糊熵<sup>[10]</sup>的概念,对灰度级进行修正实现图像增强效果,使得该方法不仅能够有效地增强局部图像的对比度,提高图像的视觉效果,而且能够在增强图像边缘的同时有效地抑制噪声.模糊集理论是一种能够有效分析人类系统的判断、感知及辨识等行为的工具,正被越来越广泛地引入到图像增强算法中,并取得了较好的效果.

综上所述,构建一种能够自然地感知图像中所含的全局场景内容、又能够清晰地突出局部细节特征的低照度彩色图像对比度增强方法,既是困难的,又是必要的.为此,本文结合模糊集理论提出全局亮度调节和局部对比度增强的方法.在全局亮度调节的前提下,利用模糊集理论的特性对邻域像素间的空间亮度关系进行对比度增强,实现调节低照度图像的全局亮度,并增强局部对比度,恢复图像细节特征,满足人眼在不同视觉区域的感知需求.

## 1 彩色图像增强方法

本文算法主要包括自适应 SIN 函数全局亮度调节和结合改进的模糊集理论的局部细节增强,具体处理流程如图 1 所示.由于 RGB 颜色空间具有较高的色彩相关性,故将图像从 RGB 空间转换到色彩相关性小的 HSV 空间,得到亮度分量  $V$ 、色调分量  $H$  和饱和度分量  $S$ ,利用式(1)~(3)完成色彩空间转换,最后保持后两个分量不变,仅处理亮度分量:

$$V = \frac{1}{\sqrt{3}}(R+G+B), \tag{1}$$

$$H = \begin{cases} \theta, & G \geq B; \\ 2\pi - \theta, & G < B. \end{cases} \tag{2}$$

式中, $R$ 、 $G$ 、 $B$  分别代表原彩色图像 RGB 空间的像素值; $\theta$  由式(3)给出:

$$\theta = \arccos \frac{(R-G) + (R-B)}{2\sqrt{(R-G)^2 + (R-B)(G-B)}}. \tag{3}$$

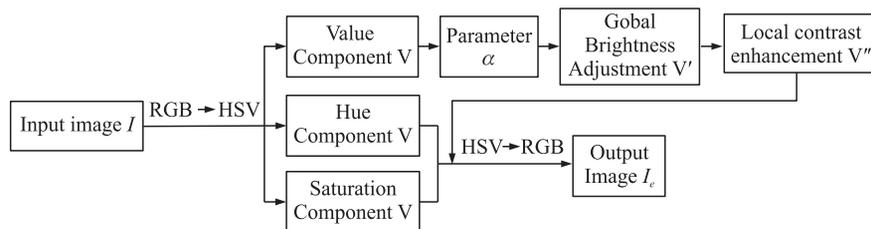


图 1 本文算法流程图

Fig. 1 Flow chart of proposed algorithm

### 1.1 自适应全局亮度调节

低照度彩色图像全局亮度增强的关键在于设置一种合适的单调递增的非线性归一化函数,常用的非线性映射函数有对数函数、指数函数、幂函数、S 形的双曲正切函数以及组合后的复合函数等<sup>[11-12]</sup>,要求满足  $y=f(x) \geq x, 0 \leq f(x) \leq 1, x \in [0, 1]$ . 其中,  $x$  代表低照度图像的  $V$  空间像素值. 文献[13-15]分别设计了 3 种满足条件的非线性函数,如式(4)~(6)所示:

$$y = 1 - (x-1)^2, x \in [0, 1]; \quad (4)$$

$$y = x^{\alpha/3+1/3}, \alpha \in [0, 1], x \in [0, 1]; \quad (5)$$

$$y = \sqrt{\alpha x}, \alpha \in [0, 1], x \in [0, 1]. \quad (6)$$

可以发现,文献[13]的非线性函数(式(4))相比于其他两个函数(式(5)、式(6))更占优势,无需设置参数的值,因此,更具有自适应性.

本文提出一种新的非线性全局映射模型,即 SIN 函数自适应全局亮度映射,如式(7)所示,根据人眼视觉特性调节  $\alpha$  的取值来修正 SIN 函数,并保证其输出不会溢出.修正后的 SIN 函数是非常灵活的映射曲线, $\alpha$  取值的不同可以影响映射曲线的走向,适用于处理不同明暗特征的图像.

$$I_c = 1 - [1 - \sin(\alpha I_v)]^2, I_v \in [0, 1], \alpha \in [1, \pi/2]. \quad (7)$$

式中, $I_v$  为原始彩色图像的  $V$  空间像素灰度; $I_c$  为增强后彩色图像的  $V$  空间像素灰度; $\alpha$  为自适应调整参数.对式(4)进行简单的变换,对像素灰度  $I_v$  求取正弦值,再做非线性变换,所得不同的参数值  $\alpha$  下的曲线如图 2 所示.

从图 2 可以看出,用式(7)处理全局图像亮度有明显优势,即通过调整参数使得图像较亮区域的亮度不会被快速增强,同时较暗区域的亮度也不会被过度削弱.同时,式(7)的曲线全部都在式(4)的曲线之上,亮度调节能力明显优于式(4),图像增强效果更好.通过式(8)设置自适应调整参数  $\alpha$ :

$$\alpha = \begin{cases} \pi/2, & L \leq 60; \\ 1.4, & 60 < L \leq 180; \\ 1.2, & L > 180. \end{cases} \quad (8)$$

式中, $L(0 \leq L \leq 255)$  表示图像的像素灰度.当图像中 30% 或更多的像素灰度低于 60,则认为图像很暗, $\alpha = \pi/2$ ;当 80% 或更多的像素灰度大于 180 时,则认为图像较亮, $\alpha = 1.2$ ;对于其他像素灰度情况,则  $\alpha = 1.4$ .因此,针对不同的低照度图像可以动态地调节参数  $\alpha$  的值,通过对式(7)多次迭代,使得增强后图像更加满足人眼观察效果.

## 1.2 自适应局部对比度增强

经过亮度调节,图像的暗区域变亮,同时图像的动态范围也被压缩,图像对比度变差,为此需要对亮度调节后的图像进行对比度的增强处理.由人眼视觉系统的研究可知,人眼对于局部对比度增强处理更为敏感,而模糊集理论依据图像具体灰度像素特点,将图像的均值作为分界,即利用像素灰度与图像的加权平均值的关系,将图像像素灰度分为两部分,采取不同的隶属度函数将图像像素由空间域变换到模糊域,在此过程中,设置两个辅助参量加权平均值  $M$  和增强控制参数  $K$ ,从而实现局部对比度增强<sup>[16]</sup>.

首先对图像  $V$  空间的像素灰度进行直方图统计求得  $h(x)$ ,利用  $h(x)$  计算求得图像加权平均值  $M$ ,如式(9)所示:

$$M = \frac{\sum_x xh(x)}{\sum_x h(x)}. \quad (9)$$

$M$  将图像灰度级分为两个集合  $C_1 \in [0, M-1]$  和  $C_2 \in [M, 255]$ ,分别计算两个集合下所对应的隶属度函数  $\mu_{d1}$  和  $\mu_{d2}$ .

增强参数  $K$  用于计算  $C_1$  和  $C_2$  中的增强后像素灰度,经多次实验发现,为了获得更好的增强结果,将  $K$  值定义为 128.计算增强后的像素灰度规则满足以下两条:

(1)  $C_1$  部分:若像素灰度  $x$  与均值  $M$  相差越大,则改善的像素灰度越小.也即,像素灰度与  $M$  值越相似,其被增强的越大;反之,其被增强的越小.其隶属度函数和像素灰度变换公式如式(10)和(11)所示:

$$\mu_{d1} = \frac{1 - (M - I_c * 255)}{M}, \quad (10)$$

$$I_L = |I_c * 255 + \mu_{d1} * K|. \quad (11)$$

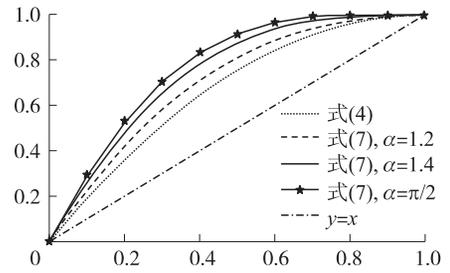


图 2 式(7)在不同参数下的曲线图

Fig. 2 Curves diagram of function(7) under different parameter values

(2)  $C_2$  部分:若像素灰度  $x$  与最大值  $E(E=255)$  相差很大,则其被改善的像素灰度越大. 也即,像素灰度与  $E$  越相似,其被增强的越小;反之,其被增强的越大. 其隶属度函数和像素灰度变换公式如式(12)和(13)所示:

$$\mu_{D2} = \frac{E - I_C * 255}{E - M}, \tag{12}$$

$$I_L = I_C * \mu_{D2} * 255 + (E - \mu_{D2} * K). \tag{13}$$

将计算得出的  $I_L$  进行归一化,得到增强后  $V$  空间的像素灰度,并与原彩色空间的  $H$  和  $S$  组成增强后的  $HSV_e$ ,同时将图像由  $HSV_e$  空间转换回  $RGB_e$  空间内.

### 1.3 彩色空间恢复

通过上述亮度调节和局部对比度增强后,获得增强后的彩色图像. 利用原始图像中的色彩信息,通过简单的线性操作即可恢复增强后图像的彩色信息. 由于是线性操作,恢复后的图像各像素点的  $R$ 、 $G$ 、 $B$  3 个分量的比例关系保持不变,因而能够较好地保留原始图像中的颜色信息. 增强后图像彩色信息的恢复方法如下:

$$I'_j(x, y) = \beta(x, y) \cdot I_j(x, y), \tag{14}$$

式中,  $\beta(x, y) = \frac{I_L(x, y)}{I_V(x, y)}$ , 为点  $(x, y)$  处的比例增强因子,  $I_V(x, y)$  为原始图像的  $V$  空间分量,  $I_L(x, y)$  为增强后图像的  $V$  空间分量;  $I_j(x, y)$  为原始图像的  $R$ 、 $G$ 、 $B$  空间分量像素灰度值,  $j=r, g, b$ ;  $I'_j(x, y)$  为增强后彩色图像的三通道分量像素灰度值,  $j=r, g, b$ .

## 2 实验结果与分析

本文针对所提出的自适应全局亮度调节和局部对比度增强的图像增强方法进行了大量的实验,并与直方图均衡化增强方法、GLG 方法、Retinex 方法和文献[12]进行主观和客观的分析对比. 为了验证提出的改进方法的处理效果,将提出的算法在计算机上进行仿真实验. 仿真实验用计算机配置 CPU 为 Intel Core i5 6200U,主频 2.30 GHz,内存 4.00 GB,算法的运行平台为 MATLAB 2016a.

因篇幅所限,本文选取 4 幅低照度彩色图像并作出其直方图统计分布图,如图 3 中(a)~(d)和(e)~(h)所示. 通过对图 3 中各原始图像的直方图统计分布情况分析可知,低照度图像的像素灰度主要集中在左侧,需要对实验图像进行增强处理,使得其动态范围扩大.

实验中,首先将待增强的彩色图像从 RGB 空间转换到 HSV 空间,将色度、饱和度信息和亮度信息分

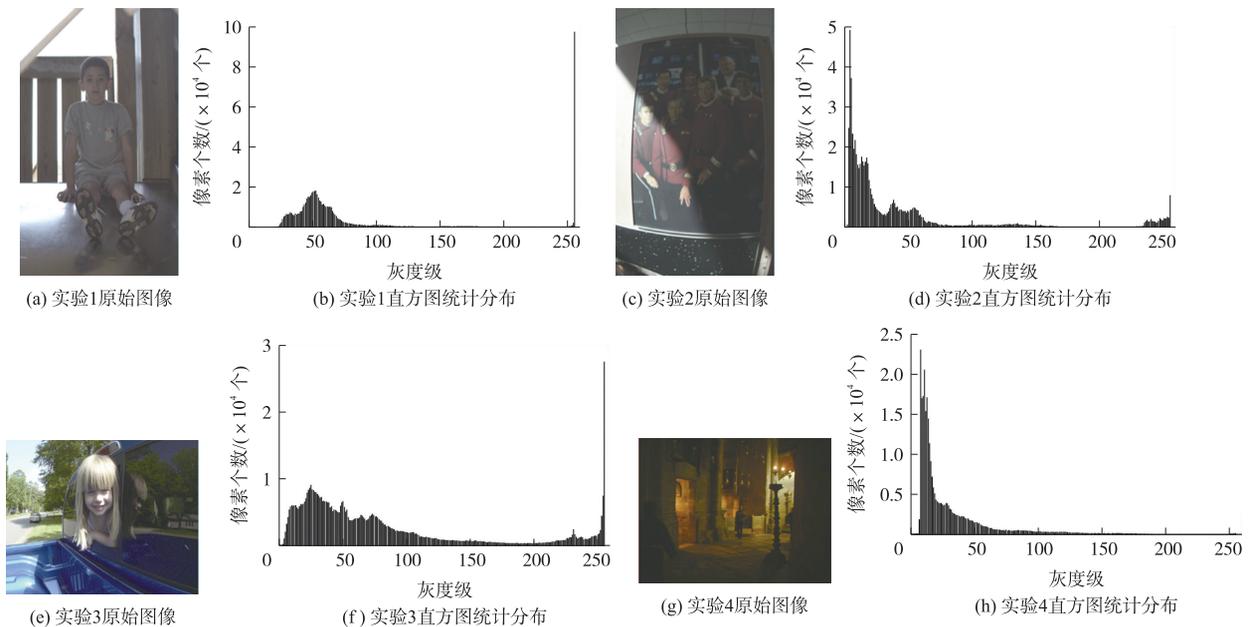


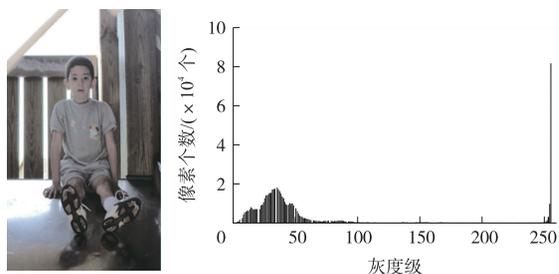
图 3 原始图像及其直方图统计分布

Fig. 3 The original images and their histograms

开;然后仅对亮度空间分量进行全局亮度调节和局部对比度的增强处理;最后将原图的色度和饱和度空间分量和增强后的亮度空间分量合并,转换回 RGB 彩色空间,得到最终增强图像.采用主客观评价方式综合评价实验结果,客观上分别选取亮度均值(反映图像的整体亮度)、信息熵(反映图像的细节信息)和对对比度提升指数(反映图像的对对比度信息)3个指标来评价本文方法与其他几种同类方法的优劣.

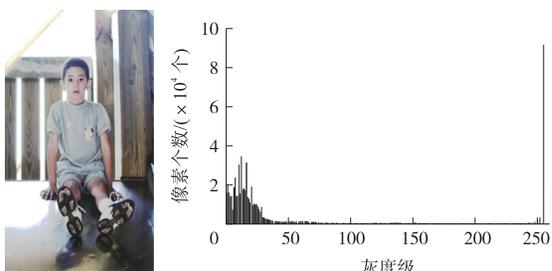
### 2.1 实验结果

实验结果如图4~图7所示.其中(a)、(b)显示,4幅低照度彩色图像经HE方法处理后,图像颜色整



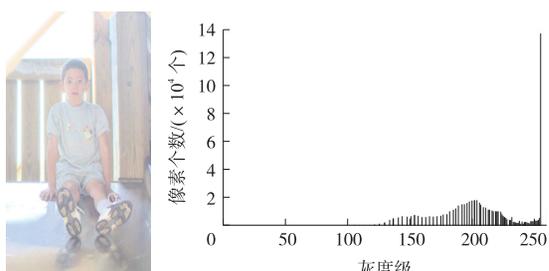
(a) HE方法

(b) HE方法直方图统计分布



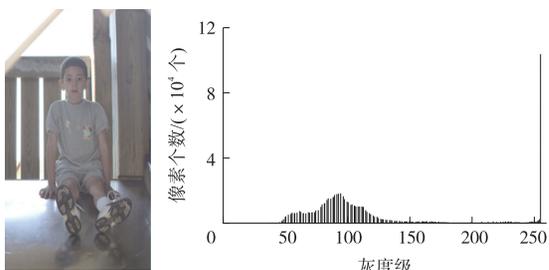
(c) GLG方法

(d) GLG方法直方图统计分布



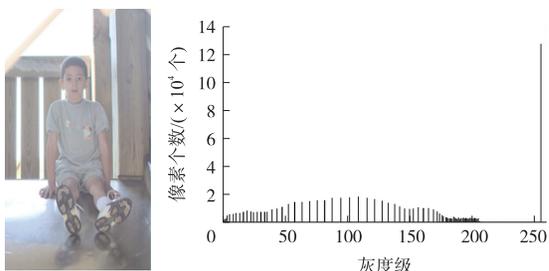
(e) Retinex方法

(f) Retinex方法直方图统计分布



(g) 文献[12]方法

(h) 文献[12]方法直方图统计分布

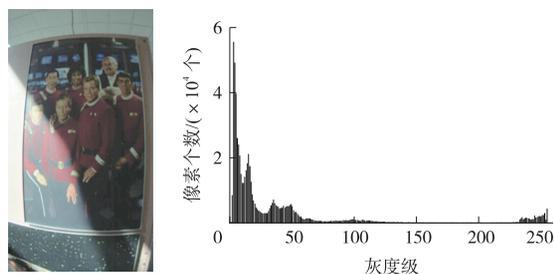


(i) 本文方法

(j) 本文方法直方图统计分布

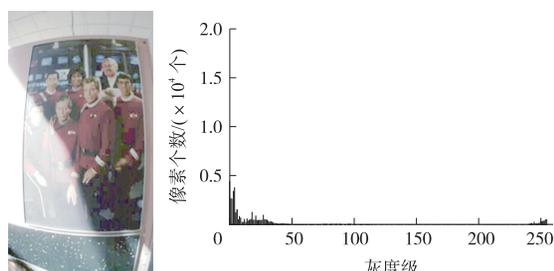
图4 实验1处理结果比较

Fig.4 Comparison of enhanced images for experiment No. 1



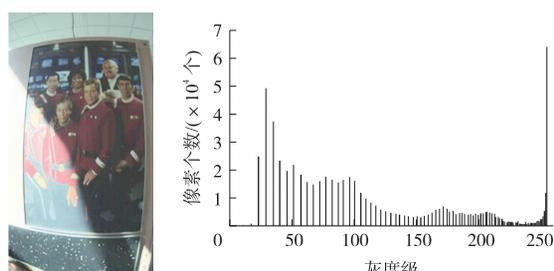
(a) HE方法

(b) HE方法直方图统计分布



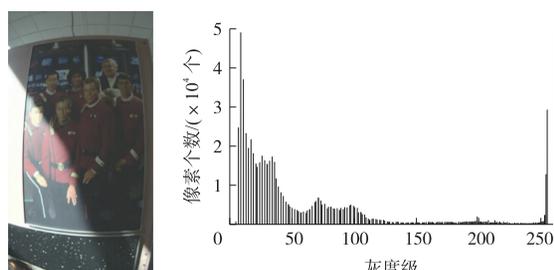
(c) GLG方法

(d) GLG方法直方图统计分布



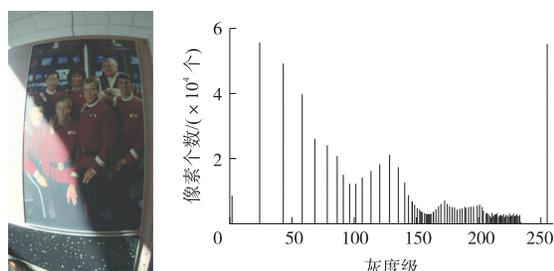
(e) Retinex方法

(f) Retinex方法直方图统计分布



(g) 文献[12]方法

(h) 文献[12]方法直方图统计分布



(i) 本文方法

(j) 本文方法直方图统计分布

图5 实验2处理结果比较

Fig.5 Comparison of enhanced images for experiment No. 2

体偏亮,直方图分布呈两级分化;(c)、(d)显示,经 GLG 方法处理后,图像颜色整体有所失真,直方图分布依旧呈两级分化;(e)、(f)显示,经 Retinex 方法处理后,图像出现模糊现象,过增强导致图像发白,直方图分布主要集中在大像素灰度值区域;(g)、(h)显示,经文献[12]方法处理后,图像的亮度和对比度都有效改善,但直方图分布主要集中在小像素灰度值区域;(i)、(j)显示,经本文方法处理后,图像的亮度和对比度都是比较适合人眼观察的,同时直方图分布均匀。

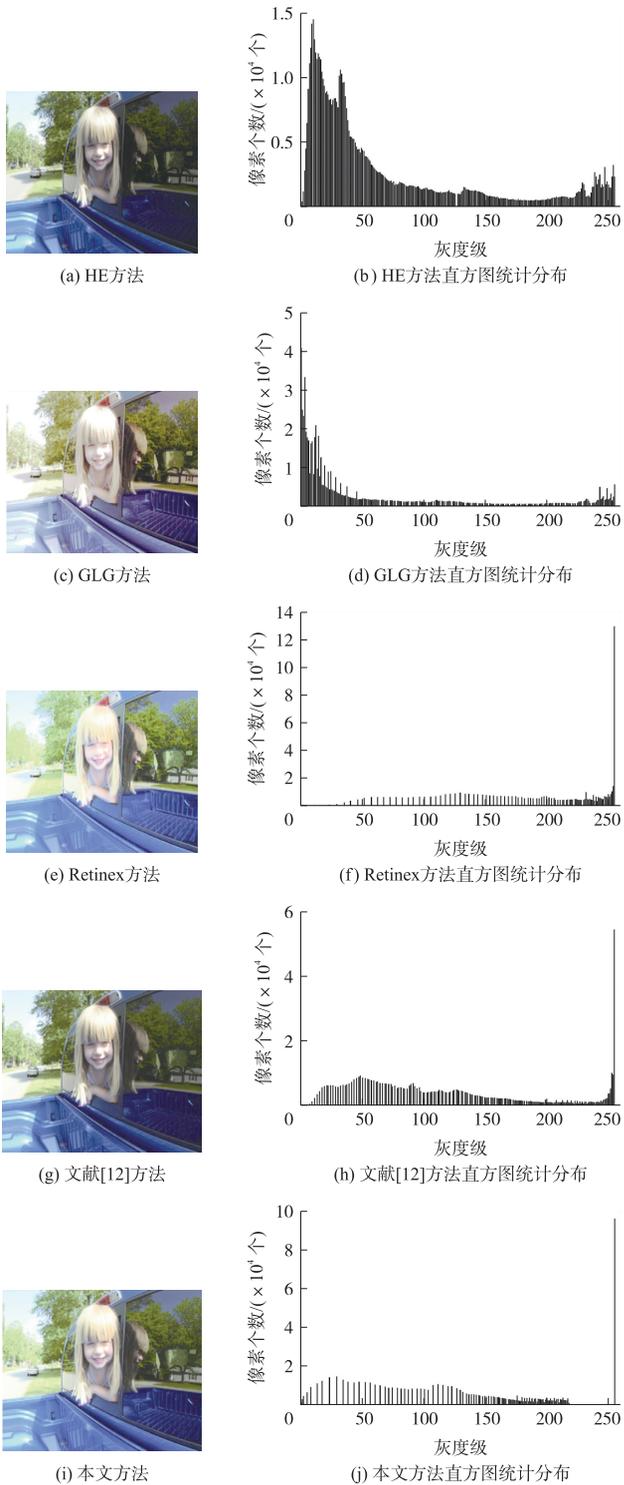


图 6 实验 3 处理结果比较

Fig. 6 Comparison of enhanced images for experiment No. 3

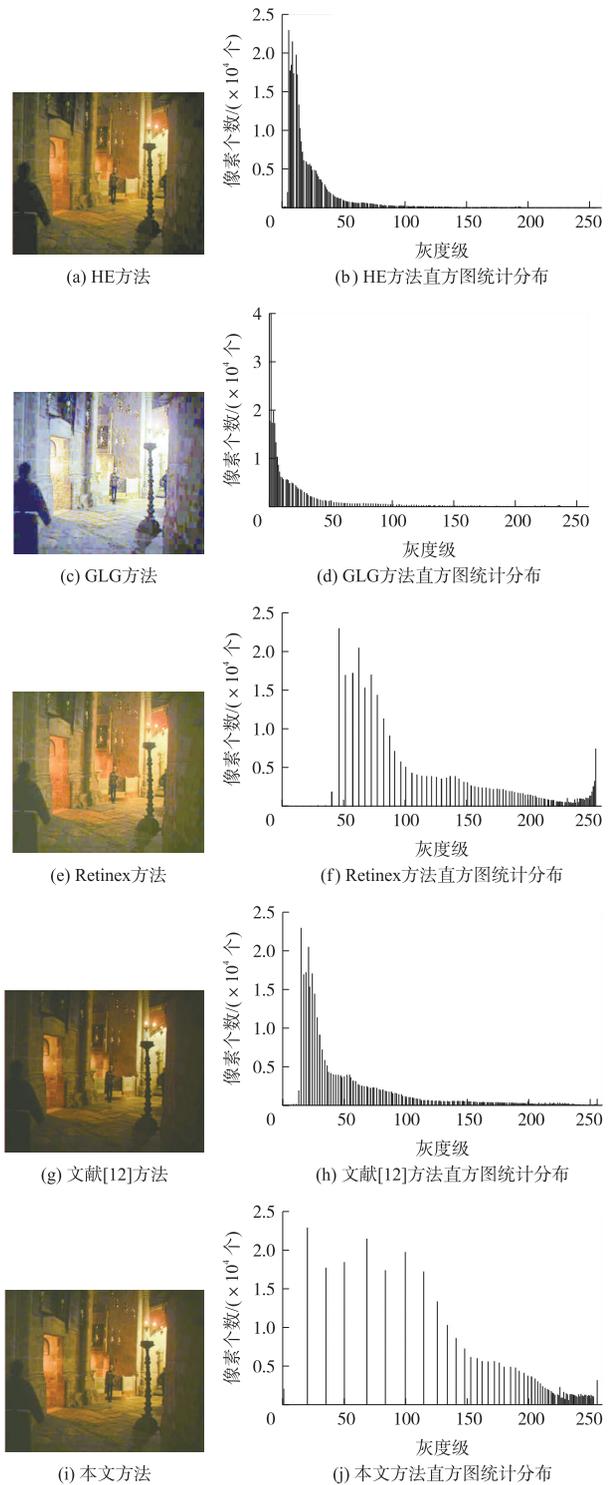


图 7 实验 4 处理结果比较

Fig. 7 Comparison of enhanced images for experiment No. 4

## 2.2 实验分析

### 2.2.1 客观评价

为了更好地评价本文增强算法的有效性,特选用亮度均值、信息熵和对比度提升指数 3 个指标来评判. 相比而言,前两个指标较常用,在此只列出对比度提升指数的定义:

$$CI = \frac{C_{\text{proposed}}}{C_{\text{original}}}. \quad (15)$$

将图像分为  $3 \times 3$  小块,  $C$  为所有  $3 \times 3$  小块图像对比度的均值,小块对比度定义为:

$$C = \frac{\max - \min}{\max + \min}, \quad (16)$$

式中,  $\max$  为小块图像灰度值的最大值;  $\min$  为小块图像灰度值的最小值. 下标  $\text{original}$  和  $\text{proposed}$  分别表示增强前后的图像.

表 1~表 4 为原始图像和经各种方法处理后图像的客观指标评价. 从均值的角度看,各种增强方法均有效提升了原始图像的亮度. 实验 1 和实验 3 中,本文方法均值高于 HE 方法、GLG 方法和文献[12]方法,但低于 Retinex 方法的均值,在图 4~图 7 图像(c)中也可以发现该方法出现过增强现象;而实验 2 和实验 4 中,采用本文方法获得的图像均值虽未高于其他方法,但图像视觉效果更能满足人眼需求. 从信息熵的角度看,各方法均反映出图像细节被显著增强. 从对比度提升指数角度看,尽管其他方法的评价值较高,但视觉效果不好,无法与本文方法相比. 因此,权衡主观视觉效果和客观评价指标,本文方法优于其他 4 种方法.

表 1 实验 1 数据比较

Table 1 The data comparisons of experiment No. 1

|      | 原图       | HE 方法     | GLG 方法    | Retinex 方法 | 文献[12]方法  | 本文方法      |
|------|----------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|
| 亮度均值 | 93.248 9 | 107.876 6 | 141.673 6 | 211.082 1  | 128.891 7 | 162.211 4 |
| 信息熵  | —        | 2.784 6   | 3.032 4   | 2.684 7    | 2.727 3   | 2.905 3   |
| CI   | —        | 1.159 8   | 1.523 2   | 2.269 4    | 1.385 7   | 1.744     |

表 2 实验 2 数据比较

Table 2 The data comparisons of experiment No. 2

|      | 原图       | HE 方法    | GLG 方法  | Retinex 方法 | 文献[12]方法 | 本文方法     |
|------|----------|----------|---------|------------|----------|----------|
| 亮度均值 | 46.406 3 | 88.632 9 | 142.028 | 123.821 5  | 68.027 1 | 88.091 6 |
| 信息熵  | —        | 2.907 8  | 3.018 2 | 3.019 7    | 2.783 3  | 2.970 2  |
| CI   | —        | 1.914 8  | 3.068 3 | 2.674 9    | 1.469 6  | 1.903 1  |

表 3 实验 3 数据比较

Table 3 The data comparisons of experiment No. 3

|      | 原图       | HE 方法     | GLG 方法    | Retinex 方法 | 文献[12]方法  | 本文方法      |
|------|----------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|
| 亮度均值 | 85.395 6 | 103.293 2 | 151.860 8 | 191.900 6  | 120.238 6 | 150.126 5 |
| 信息熵  | —        | 3.073 3   | 2.859 5   | 3.106 2    | 3.066 8   | 3.122 3   |
| CI   | —        | 1.212 6   | 1.782 8   | 2.252 9    | 1.411 6   | 1.762 5   |

表 4 实验 4 数据比较

Table 4 The data comparisons of experiment No. 4

|      | 原图       | HE 方法    | GLG 方法    | Retinex 方法 | 文献[12]方法 | 本文方法     |
|------|----------|----------|-----------|------------|----------|----------|
| 亮度均值 | 32.132 8 | 78.154 3 | 156.646 4 | 119.496 1  | 55.450 6 | 83.090 4 |
| 信息熵  | —        | 2.773 1  | 3.058 9   | 2.899 7    | 2.613    | 2.827    |
| CI   | —        | 2.441 2  | 4.892 9   | 3.732 5    | 1.732    | 2.595 3  |

### 2.2.2 算法运行时间

本文中选取 3 种像素值分别为  $256 \times 256$ 、 $512 \times 512$ 、 $720 \times 512$  的同一幅低照度彩色图像作处理,通过统计算法的运行时间,将其他 4 种算法与本文提出的算法的实时性进行比较. 算法运行时间如表 5 所示. 由表 5 可知,本文方法具有良好的实时性.

### 3 结语

本文提出一种结合人眼视觉特性和模糊集理论的全局亮度调节和局部对比度增强的方法,有效改善了低照度彩色图像的亮度和对比度低、图像细节信息不清晰的问题. 针对低照度彩色图像亮度低的问题,结合非线性正弦函数对图像进行全局亮度调节,多次迭代确定最佳图像;同时,结合模糊集理论提出局部对比度增强方法,解决图像局部对比度低的问题. 最后利用亮度均值、信息熵和对比度提升指数 3 个指标对增强后图像进行客观比较,实验结果表明本文方法优于其他 4 种增强方法,处理后的图像清晰度高、可视效果好.

表 5 5 种算法运行时间比较

Table 5 Comparison of processing time with five algorithms

| 使用方法       | 运行时间/ms |         |         |
|------------|---------|---------|---------|
|            | 256×256 | 512×512 | 720×512 |
| HE 方法      | 150     | 567     | 759     |
| GLG 方法     | 253     | 1 150   | 1 890   |
| Retinex 方法 | 368     | 1 070   | 1 554   |
| 文献[12]方法   | 980     | 2 700   | 3 950   |
| 本文方法       | 168     | 300     | 649     |

### [参考文献](References)

[1] 武昆,李桂菊,韩广良,等. 四元数引导滤波彩色图像细节增强[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2017,29(3):419-427.  
WU K,LI G J,HAN G L,et al. Color image detail enhancement based on quaternion guided filter[J]. Journal of computer-aided design and computer graphics,2017,29(3):419-427.(in Chinese)

[2] 云海蛟,吴志勇,王冠军,等. 结合直方图均衡和模糊集理论的红外图像增强[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2015,27(8):1498-1505.  
YUN H J,WU Z Y,WANG G J,et al. Enhancement of infrared image combined with histogram equalization and fuzzy set theory[J]. Journal of computer-aided design and computer graphics,2015,27(8):1498-1505.

[3] 赵宏宇,肖创柏,禹晶,等. 马尔科夫随机场模型下的 Retinex 夜间彩色图像增强[J]. 光学精密工程,2014,22(4):1048-1055.  
ZHAO H Y,XIAO C B,YU J,et al. A Retinex algorithm for night color image enhancement by MRF[J]. Optics and precision engineering,2014,22(4):1048-1055.(in Chinese)

[4] 赵军辉,吴玉峰,胡坤融,等. 基于 Lab 色彩空间和色调映射的彩色图像增强算法[J]. 计算机科学,2018,45(2):297-300.  
ZHAO J H,WU Y F,HU K R,et al. Color image enhancement algorithm based on lab color space and tone mapping[J]. Computer science,2018,45(2):297-300.(in Chinese)

[5] 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 transactions on image processing,1997,6(7):965-976.

[6] WANG Y,WANG H,YIN C,et al. Biologically inspired image enhancement based on Retinex[J]. Neurocomputing,2016,177:373-384.

[7] 张菲菲,谢伟,石强,等. 人眼视觉感知驱动的梯度域低照度图像对比度增强[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2014,26(11):1981-1988.  
ZHANG F F,XIE W,SHI Q,et al. A perception-inspired contrast enhancement method for low-light images in gradient domain[J]. Journal of computer-aided design and computer graphics,2014,26(11):1981-1988.(in Chinese)

[8] CHEN Z Y,ABIDI B R,PAGE D L,et al. Gray-Level Grouping(GLG):an automatic method for optimized image contrast enhancement-part I:the basic method[J]. IEEE transactions on image processing,2006,15(8):2290-2302.

[9] PAL S K,KING R A. Image enhancement using smoothing with fuzzy sets[J]. IEEE transactions on systems man and cybernetics,1981,11(7):494-501.

[10] 王保平,刘怀亮,李南京,等. 一种新的自适应图像模糊增强算法[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版),2005,32(2):307-313.  
WANG B P,LIU H L,LI N J,et al. A novel adaptive image fuzzy enhancement algorithm[J]. Journal of Xidian university (natural science edition),2005,32(2):307-313.(in Chinese)

(下转第 38 页)

- [7] 万维. 基于深度学习的目标检测算法研究及应用[D]. 成都:电子科技大学,2015.  
WAN W. Research and application of target detection algorithm based on in-depth learning[D]. Chengdu:University of Electronic Technology,2015.(in Chinese)
- [8] 吴慧. 基于深度学习的遥感影像目标检测[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.  
WU H. Target detection of remote sensing imaging based on in-depth learning[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology, 2016.(in Chinese)
- [9] ROSS G,JEFF D. Region-based convolutional networks for accurate object detection and segmentation[J]. IEEE translations on pattern analysis and machine intelligence,2016,38(1):142-158.
- [10] HE K,ZHANG X,REN S,et al. Spatial pyramid pooling in deep convolutional networks for visual recognition[J]. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence,2015,37(9):1904-1916.
- [11] 潘广贞,孙艳青,王凤. 基于 Fast RCNN 模型的车辆阴影去除[J]. 计算机工程与设计,2018(3):819-823.  
PAN G Z,SUN Y Q,WANG F. Removal of vehicle shadow based on fast RCNN model[J]. Computer engineering and design, 2018(3):819-823.(in Chinese).
- [12] REN S,HE K,GIRSHICK R,et al. Faster R-CNN:towards real-time object detection with region proposal networks[C]// Advances in Neural Information Processing Systems. Montreal,Canada,2015:91-99.
- [13] 桑军,郭沛,项志立,等. Faster R-CNN 的车型识别分析[J]. 重庆大学学报,2017,40(7):32-36.  
SANG J,GUO P,XIANG Z L,et al. Vehicle detection based on faster-RCNN[J]. Journal of Chongqing university,2017, 40(7):32-38.(in Chinese).
- [14] ABDELGHAFAR A A. Influence of sinusoidal and square voltages on partial discharge inception in geometries with point-like termination[J]. High voltage,2018,15(3):31-37.
- [15] 廖星宇.深度学习入门之 PyTorch[M]. 北京:电子工业出版社,2017.  
LIAO X Y. PyTorch of deep learning[M]. Beijing:Electronic Industry Press,2017.(in Chinese)

[责任编辑:严海琳]

(上接第 32 页)

- [11] 秦绪佳,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.  
QIN X J,WANG H L,DU Y C,et al. Structured light image enhancement algorithm based on Retinex in HSV color space[J]. Journal of computer-aided design and computer graphics,2013,25(4):488-493.(in Chinese)
- [12] ZHOU Z G,SANG N,HU X R. Global brightness and local contrast adaptive enhancement for low illumination color image[J]. Optik-international journal for light and electron optics,2014,125(6):1795-1799.
- [13] 王守觉,丁兴号,廖英豪,等. 一种新的仿生彩色图像增强方法[J]. 电子学报,2008,36(10):1970-1973.  
WANG S J,DING X H,LIAO Y H,et al. A novel bio-inspired algorithm for color image enhancement[J]. Acta electronica sinica,2008,36(10):1970-1973.(in Chinese)
- [14] 郑江云,江巨浪,黄忠. 基于 RGB 灰度值缩放的彩色图像增强[J]. 计算机工程,2012,38(2):226-228.  
ZHENG J Y,JIANG J L,HUANG Z. Color image enhancement based on RGB gray value scaling[J]. Computer engineering, 2012,38(2):226-228.(in Chinese)
- [15] GUO P,YANG P X,LIU Y,et al. An adaptive enhancement algorithm for low illumination image based on hue reserving[C]// Proc of Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference(CSQRWC). Harbin,China,2011:1247-1250.
- [16] RAJU G,NAIR M S. A fast and efficient color image enhancement method based on fuzzy-logic and histogram[J]. Internation journal of electronics and communications,2014,68:237-243.

[责任编辑:严海琳]