

## 基于颜色恒常性的低照度图像视见度增强

禹晶<sup>1</sup> 李大鹏<sup>2</sup> 廖庆敏<sup>1,3</sup>

**摘要** 在彩色成像过程中,低照度是导致图像降质的一个重要因素.本文提出了一种新的基于颜色恒常性的低照度图像视见度增强算法.为了避免场景光源的影响,提出了像素有效集的概念.基于灰色调算法的灰度像素假设,利用有效像素估计光照的颜色;在后处理阶段,利用有效像素的灰度级范围确定直方图剪裁的上下限.实验表明,算法有效地校正了图像的颜色、对比度和亮度,从而增强了图像的视见度,且不会产生 Retinex 算法所固有的灰化效应和 Halo 效应.

**关键词** 颜色恒常性,视见度增强,白平衡,Retinex,人眼视觉系统

**DOI** 10.3724/SP.J.1004.2011.00923

### Color Constancy-based Visibility Enhancement of Color Images in Low-light Conditions

YU Jing<sup>1</sup> LI Da-Peng<sup>2</sup> LIAO Qing-Min<sup>1,3</sup>

**Abstract** Color imaging in low-light conditions is often significantly degraded by insufficient lighting and color cast. In this paper, we present a novel color constancy-based method to enhance the visibility of low-light images. Due to the occurrence of the scene illuminant or specular highlights, inhomogeneous illumination affects the estimation of the illuminant color across the scene. Thus in the image, an active set of pixel values is defined to reduce their effects. We then propose an improvement on the gray-pixel assumption imposed by the shades-of-gray algorithm using the active set. The improved shades-of-gray algorithm is applied to low-light image visibility enhancement for cast removal. Limits of histogram clipping are found in the active set in the post-processing step that is added to render the resulting image with a good lightness and contrast range. Results on a variety of low-light images demonstrate that the proposed method can achieve a good correction for lightness, contrast and color fidelity without local graying-out artifacts or halo artifacts intrinsic to Retinex approaches.

**Key words** Color constancy, visibility enhancement, white balance, Retinex, human visual system (HVS)

计算机视觉系统的很多应用,如城市交通、视频监控、智能车辆等,都要求图像特征的检测具备鲁棒性.然而,低照度(如夜晚、室内、曝光不足)通常导致采集的图像偏色、亮度不足及细节损失,甚至几乎不包含可见的场景信息.为了更好地展现场景信息、突出图像的特征、提高视觉系统的可靠性,校正图像的偏色、亮度和对比度是很有必要的.

目前,国内外针对低照度图像视见度增强的相关文献不多.前期的研究工作主要是利用灰度图像对比度增强的基本算法改善低照度图像的视见度,包括线性映射、增益/偏移校正(Gain/Offset correction)、直方图均衡化、伽马校正、USM 锐化(Unsharp masking, USM)等全局增强算法,以及

局部直方图均衡化、同态滤波等局部增强算法.由于彩色图像具有颜色信息,它的处理远比灰度图像复杂,灰度图像的处理方法一般不能直接应用于彩色图像.

基于人眼视觉系统(Human visual system, HVS)的全局和局部自适应特性,提出了一类仿生彩色图像增强方法,来增强彩色图像的全局和局部对比度,而不考虑颜色恒常性(Color constancy)的问题.Vonikakis 等<sup>[1]</sup>基于 HVS 的中心/邻域侧抑制机理,提出了一种二维灰度映射函数,根据中心像素和邻域像素的亮度关系,增强图像的局部对比度.该算法仅对图像的亮度分量做处理,而保持色度分量不变.王守觉等<sup>[2]</sup>基于 HVS 的亮度适应和侧抑制机理,提出了一种可变指数的幂函数变换曲线,自适应地增强图像暗区域的对比度和亮度;线性颜色复原过程保持了图像的色彩信息.

Ngo 等<sup>[3]</sup>通过融合近红外图像和非线性增强的可见光图像来获取夜晚图像的细节.Zhang 等<sup>[4]</sup>通过传递近红外图像的对比度和纹理信息,来增强可见光图像暗区域的细节.然而,以上两种方法都需要获取一对可见光/近红外图像.美国国家航空航天局

收稿日期 2010-10-09 录用日期 2010-12-27  
Manuscript received October 9, 2010; accepted December 27, 2010

1. 清华大学电子工程系 北京 100084 2. 北京工业大学计算机学院 北京 100124 3. 清华大学深圳研究生院 深圳 518055

1. Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084 2. College of Computer Science and Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124 3. Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University, Shenzhen 518055

(National Aeronautics and Space Administration, NASA) 的 Langley 研究中心深入研究基于颜色恒常性的中心/邻域 (Center/Surround) Retinex 算法, 来增强雾、烟、水下和夜晚图像的视见度<sup>[5]</sup>, 受到广泛关注. 中心/邻域 Retinex 算法的主要问题包括沿强边缘的 Halo 效应, 低对比度区域的局部灰化 (Graying-out) 效应, 以及基于灰度假设 (Gray world assumption) 的颜色校正.

本文提出了一种新的基于颜色恒常性的低照度图像视见度增强算法. 由于场景光源或高光影响了对光照的正确估计, 以及对直方图拖尾像素的正确判定, 本文提出了像素有效集的概念. 在像素有效集的基础上, 提出了改进的灰色调 (Shades-of-gray) 算法. 该算法基于灰色调算法的灰度像素假设, 利用有效像素估计光照的颜色. 在后处理阶段, 利用有效像素的灰度级范围确定直方图剪裁的上下限. 最后, 基于色调极坐标直方图 (Hue polar histogram) 的无参考客观评测准则, 定量评价本文算法与 NASA 算法的性能. 此外, 本文的算法不会产生 Retinex 算法所固有的灰化效应和 Halo 效应.

本文后续的结构组织如下: 第 1 节简单回顾已有的颜色恒常性方法. 第 2 节详细地描述本文提出的算法. 第 3 节给出实验比较与分析. 第 4 节为全文的结论.

## 1 颜色恒常性概述

颜色恒常性是人眼视觉系统的自适应特性, 指 HVS 能够在大范围不同颜色的光照条件下识别物体的真实颜色. 如图 1 所示, 在外界光照条件发生变化的时候, 人眼对颜色的感知仍能在一定程度上保持相对不变, 表现出颜色恒常性; 与 HVS 不同的是, 成像系统不能对不同的光照条件做出相应的光谱响应, 因而使采集的图像发生偏色, 也就是说, 整幅图像的颜色范围发生了偏移.

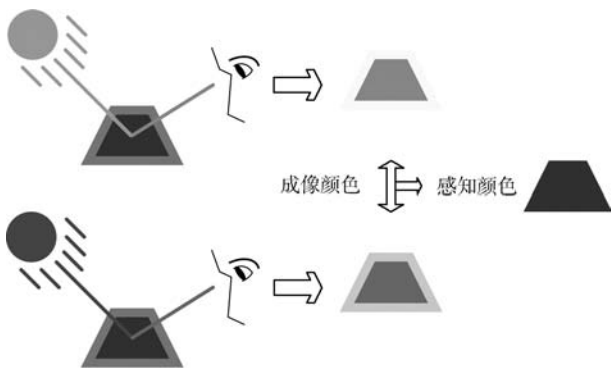


图 1 颜色恒常性示意图  
Fig. 1 Illustration of color constancy

Agarwal 等<sup>[6]</sup> 对颜色恒常性算法的相关文献进行了综述. 根据所要达到的目的, 可将颜色恒常性算法分为两类: 彩色增强和白平衡 (White balance). 前者模拟 HVS 特性对彩色图像进行增强, 使增强图像符合人眼直接观察场景的视觉感知; 后者对不同颜色光照造成的图像偏色进行校正, 使校正图像的颜色符合场景的真实颜色.

### 1.1 彩色增强

Retinex 算法是一类重要的颜色恒常性方法, 也是重要的局部对比度增强方法, 近年来成为倍受关注的研究热点. Retinex 是由视网膜 (Retina) 和大脑皮层 (Cortex) 两个词组合而成. 早在 1964 年, Land 从人眼对颜色的感知特性出发, 提出了基于颜色恒常性的 Retinex 理论<sup>[7]</sup>. Retinex 算法的目的是从图像中去除场景照度分量的影响, 获得实际反射分量. 迄今, 已经提出了多个版本的 Retinex 算法及其改进算法.

Land 于 1986 年提出了最早的中心/邻域 Retinex 算法, 也称为基于邻域 (Surround-based) 的 Retinex 算法<sup>[8]</sup>. 在此基础上, NASA Langley 研究中心的 Jobson, Rahman 和 Woodell 提出了单尺度 Retinex (Single-scale Retinex, SSR) 算法<sup>[9]</sup>, 并将其扩展到多尺度, 提出了多尺度 Retinex (Multi-scale Retinex, MSR) 算法<sup>[10]</sup>. 基于邻域的版本存在严重的颜色失真问题. 由于其本质是基于灰度假设, 当图像整体或局部区域的颜色违背灰度假设时, 处理后的颜色将变为灰色调, 称之为灰化效应. 为此, Jobson, Rahman 和 Woodell 提出了颜色复原的多尺度 Retinex (Multi-scale Retinex with color restoration, MSRCR) 算法<sup>[11-12]</sup>. 但是, MSRCR 算法的颜色复原过程实际上是通过非线性函数引入原图像的色度, 来补偿 MSR 算法处理过程中损失的颜色信息, 并不是恢复场景的真实颜色<sup>[13]</sup>. 因此, MSRCR 算法的颜色补偿实质上违背了颜色恒常性的原理. Meylan 等<sup>[14]</sup> 提出了一种基于中心/邻域 Retinex 模型的自适应滤波算法, 根据图像的边缘方向自适应调整滤波器的形状, 但仍不可避免地在图像边缘处产生 Halo 效应.

Rizzi 等<sup>[15-16]</sup> 基于 HVS 的侧抑制机理, 提出了自动颜色均衡化 (Automatic color equalization, ACE) 算法. ACE 算法实现了图像的全局和局部对比度增强, 并且综合了 (White patch, WP) 和 (Gray world, GW) 的颜色校正机制. 但是, ACE 算法的主要问题是时间复杂度过高, 并且在低对比度区域也会产生局部灰化效应.

### 1.2 白平衡

从数学角度来讲, 白平衡是一个欠定问题. 所有

的方法均建立在表面反射或光照颜色统计特性的特定假设之上. 白平衡方法又可大致分为两类: 一类是基于图像低阶特征的直接方法; 另一类是基于特定数据库的学习方法.

### 1.2.1 基于低阶特征的方法

这类方法可直接用于图像的白平衡校正, 包括 (White-point, WP) 算法<sup>[17]</sup>、(Gray-world, GW) 算法<sup>[18]</sup>、灰色调算法<sup>[19]</sup> 和 (Gray-edge, GE) 算法<sup>[20]</sup>. GW 算法和 WP 算法是两种简单的基于灰度像素假设的算法, 分别将 R、G、B 颜色分量的平均值和最大值映射到灰度轴上. Finlayson 和 Trezzi 提出了基于 Minkowski 范数的灰色调算法, 而 WP 算法和 GW 算法都是该算法的特例. Weijer 等提出了灰度边缘 (Gray edge) 假设, 并结合前面 3 种算法建立了一个统一的框架. 近期的研究工作<sup>[21-22]</sup> 基于特定自然场景图像, 提出了颜色恒常性算法的选取和融合方案.

### 1.2.2 基于学习的方法

这类方法利用在特定数据库学习过程中获取的先验知识来估计光照的颜色, 包括色域映射方法<sup>[23-24]</sup>、概率统计方法<sup>[25]</sup> 和机器学习方法<sup>[26-27]</sup>. 尽管这类方法在颜色恒常性方面取得了更好的颜色校正结果, 然而, 需获取大量的特定图像用于训练.

## 2 本文的算法

本文提出了一种改进的灰色调算法, 结合直方图剪裁, 用于低照度图像的视见度增强. 本文的算法可分为 3 个步骤: 1) 估计图像的白色响应值, 构造像素有效集; 2) 使用改进的灰色调算法校正图像的偏色; 3) 在有效像素的灰度级范围内确定直方图剪裁的上下限.

### 2.1 有效集的构造

人造光源经常出现在低照度场景中. 在成像过程中, 场景光源或高光比白色物体有更强的响应, 因而在获取的图像中有更大的像素值. 这样的影响导致成像传感器对白色的响应值在很大程度上偏离了白色像素值, 干扰了对光照的正确估计. 为了表述的简便性, 定义图像中像素有效集为不大于白色响应值的像素集合; 集合中的像素称为有效像素.

由于场景光源或高光在成像中有最大的响应值, 通过观察低照度图像的直方图发现, 对应部分的像素在直方图的最亮端形成一个峰. 基于梯度下降法的基本思想, 分别估计 R、G、B 颜色通道中的白色响应值. 在颜色通道  $c$  的直方图中, 搜索白色响应值的过程描述如下: 首先搜索直方图的局部极大值; 粗估计光源响应值的亮度范围在  $[0.9, 1]$  之间, 查找该亮度范围内最大亮度的峰, 峰点处的灰度值用  $P_c$  表

示; 从该灰度值  $P_c$  开始, 向灰度值递减的方向扫描每个灰度级  $l \in [0, P_c]$ ; 当满足以下两个条件之一时,

$$p_c(l-1) - p_c(l) > \xi \quad (1)$$

$$|p_c(l-1) - p_c(l)| < \zeta \quad (2)$$

终止搜索. 当前灰度值即为颜色通道  $c$  中的白色响应估计值, 用  $W_c$  表示. 式中,  $p_c(l)$  表示灰度级  $l \in [0, 255]$  的直方图概率值;  $\xi = 10^{-4}$  和  $\zeta = 10^{-6}$  为根据实验统计确定的阈值. 其中,  $c = \{R, G, B\}$  分别表示 R、G、B 颜色通道. 为了便于在式 (1) 和式 (2) 中描述灰度值的递减, 使用的灰度级范围为  $[0, 255]$ .

图 2 直观地解释了白色响应的物理意义. 图 2 (a) 左图在钨丝灯的环境下拍摄, 颜色偏黄色; 而图 2 (b) 在荧光灯的照射下则偏绿色. 图 3 为对应图 2 左图的 R、G、B 颜色分量直方图, 在接近直方图的最亮端产生一个明显的峰. 图中用  $\circ$  号标识直方图的局部极大值 (即峰值), 用  $\times$  号标识白色响应值  $W_c$ . 将图 2 左图的灰度值从  $[0, W_c]$  线性映射到  $[0, 1]$  范围内, 图 2 右图为对应的映射结果, 在这种情形下, 白色响应值映射为  $(1, 1, 1)^T$ . 其中, 图 2 (a) 为斯坦福大学纪念教堂 (Stanford Memorial Church, SMC), 可在 Google 图片中搜索相关照片. 从图 2 中可以得出, 本文估计白色响应值的方法是行之有效的.



图 2 白色响应的图示 (左列: 原图像; 右列: 映射图像)  
Fig. 2 Illustration of white response (Left: Input image; Right: Mapped image)

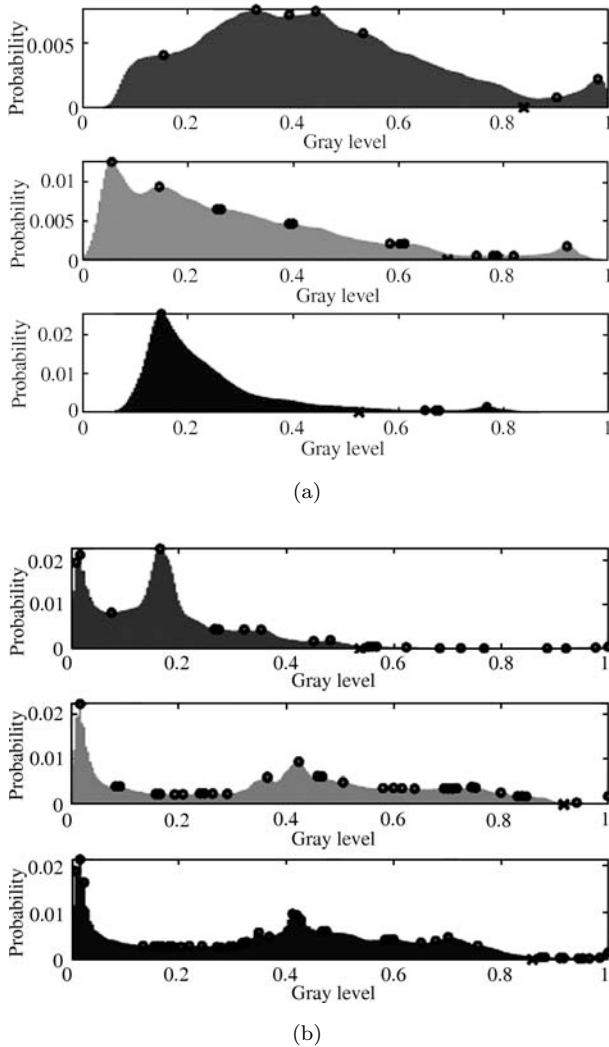


图3 图2左图的R、G、B颜色分量直方图(符号“o”标识直方图的局部极大值(即峰值),符号“x”标识白色响应值)

Fig.3 Red, green and blue component histograms corresponding to the left images in Fig.2 (The circle “o” marks all peak values, the cross “x” marks the white response estimate.)

## 2.2 改进的灰度调算法

光照的变化导致成像设备采集的图像颜色偏向光源的颜色. 白平衡算法的目的是去除光照的影响, 获取物体的真实颜色. 由于基于学习的方法要求特定图像集的学习过程, 本文选取一种适合的、基于图像低阶特征的白平衡算法, 直接用于单幅可见光图像的颜色校正. GE 算法<sup>[20]</sup> 是基于灰度边缘假设, 即场景反射分量导数的闵可夫斯基范数是无色差的 (Achromatic). 作者认为在通常情况下基于灰度边缘假设的算法优于基于灰度像素假设的算法. 然而, 在大多数情形下, 低照度图像几乎没有可见的边缘, 换句话说, 基于灰度边缘假设的算法几乎没有可用

的信息. 因此, 基于灰度像素假设的算法更适合于低照度图像的白平衡过程.

在像素有效集的基础上, 提出了改进的灰色调算法. 该算法包括两步: 1) 基于灰色调算法的灰度像素假设, 利用有效像素估计光照的颜色; 2) 利用已估计的光照颜色, 使用对角模型对整幅图像进行光照校正.

### 2.2.1 灰度像素假设

对于朗伯表面, 一幅彩色图像  $\mathbf{f}(\mathbf{x}) = (f_R(\mathbf{x}), f_G(\mathbf{x}), f_B(\mathbf{x}))^T$  的生成可以表示为 3 个分量的乘积

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \int_{\omega} e(\lambda)r(\mathbf{x}, \lambda)\boldsymbol{\rho}(\lambda)d\lambda \quad (3)$$

式中, 在可见光谱范围  $\omega$  内, 光源光谱能量分布函数  $e(\lambda)$ 、空间坐标  $\mathbf{x}$  处的表面光谱反射函数  $r(\mathbf{x}, \lambda)$ 、传感器光谱敏感度函数  $\boldsymbol{\rho}(\lambda)$ , 均是关于波长  $\lambda$  的函数. 假设场景中为单色光照, 光照的颜色  $\mathbf{e}$  取决于可见光谱范围  $\omega$  内的光源光谱能量分布函数  $e(\lambda)$  和传感器光谱敏感度函数  $\boldsymbol{\rho}(\lambda)$ , 可表示为

$$\mathbf{e} = (e_R, e_G, e_B)^T = \int_{\omega} e(\lambda)\boldsymbol{\rho}(\lambda) d\lambda \quad (4)$$

灰色调算法假设场景反射分量的闵可夫斯基范数是无色差或灰色的, 即

$$L_c(p) = \left( \frac{\int f_c^p(\mathbf{x}) d\mathbf{x}}{\int d\mathbf{x}} \right)^{\frac{1}{p}} = ke_c \quad (5)$$

式中,  $L_c(p)$  表示  $p$  阶闵可夫斯基范数 ( $p$ -范数),  $c = \{R, G, B\}$  分别表示 R、G、B 颜色通道;  $k$  为 0 (全吸收) 和 1 (全反射) 之间的常量.

文献 [19] 指出 GW 算法和 WP 算法是闵可夫斯基范数的两个特例. 当  $p = 1$  时,  $\mathbf{L}(1)$  为灰度假设 (1-范数); 当  $p = \infty$  时,  $\mathbf{L}(\infty)$  计算 R、G、B 颜色分量的最大值 ( $\infty$ -范数). GW 算法是基于灰度假设, 即假设平均场景反射分量是无色差或灰色的, 可表示为

$$\mathbf{L}(1) = \frac{\int \mathbf{f}(\mathbf{x})d\mathbf{x}}{\int d\mathbf{x}} = k\mathbf{e} \quad (6)$$

WP 算法, 也称为 Max-RGB 算法, 假设最大场景反射分量是无色差或灰色的, 可表示为

$$\mathbf{L}(\infty) = \max_{\mathbf{x}} \mathbf{f}(\mathbf{x}) = k\mathbf{e} \quad (7)$$

其中, 在独立的颜色通道中执行最大值操作.

对于灰色调算法, 随着  $p$  值的增大, 将逐渐逼近 WP 算法的白平衡图像. 但是, 场景光源或高光的出现意味着图像中最大反射分量大于白色响应值. 因此, WP 算法使用 R、G、B 颜色分量的最大值来估计光照的颜色将导致错误的结果. 为此, 本文仅用图像中有效像素计算  $L_c(p)$ , 用  $\mathcal{A}$  表示像素有效集, 改进的灰色调算法的假设条件可改写为

$$L_c^A(p) = \left( \frac{\int_{\mathbf{x} \in \mathcal{A}} f_c^p(\mathbf{x}) d\mathbf{x}}{\int_{\mathbf{x} \in \mathcal{A}} d\mathbf{x}} \right)^{\frac{1}{p}} = ke_c \quad (8)$$

这样,  $L^A(\infty)$  实际上就是 R、G、B 颜色分量的白色响应值. 在改进的灰色调算法中, 随着  $p$  值的增大, 将逐渐逼近用白色响应值来估计光照的颜色. 因此, 改进的灰色调算法也提高了参数  $p$  的鲁棒性.

### 2.2.2 对角模型

获得光照颜色的估计值后, 利用该估计值对整幅图像的颜色进行校正. Kries 假设白平衡是利用 3 个不同的增益系数, 独立调整 3 个锥状信号的过程<sup>[28]</sup>. 因此, 光照校正可用对角变换表示为

$$\begin{bmatrix} f_R'(\mathbf{x}) \\ f_G'(\mathbf{x}) \\ f_B'(\mathbf{x}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_R & 0 & 0 \\ 0 & s_G & 0 \\ 0 & 0 & s_B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_R(\mathbf{x}) \\ f_G(\mathbf{x}) \\ f_B(\mathbf{x}) \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中,  $f_R(\mathbf{x})$ 、 $f_G(\mathbf{x})$ 、 $f_B(\mathbf{x})$  和  $f_R'(\mathbf{x})$ 、 $f_G'(\mathbf{x})$ 、 $f_B'(\mathbf{x})$  分别表示变换前后的 R、G、B 颜色分量值. 增益系数  $s_R$ 、 $s_G$ 、 $s_B$  将未知光照下的图像颜色映射到正则光照 (通常是白光) 下的相应颜色.

由于人眼对绿色更为敏感, 本文保持 G 分量不变 (即  $s_G = 1$ ), 仅校正 R 分量和 B 分量的像素值. R 分量和 B 分量的增益系数  $s_R$  和  $s_B$  的计算式为

$$s_R = \frac{e_G}{e_R} = \frac{L_G^A(p)}{L_R^A(p)} \quad (10)$$

$$s_B = \frac{e_G}{e_B} = \frac{L_G^A(p)}{L_B^A(p)} \quad (11)$$



(a) 原图像  
(a) Input image



(b)  $p = \infty$   
(b)  $p = \infty$



(c)  $p = 2$   
(c)  $p = 2$

图 4 改进的灰色调算法的白平衡图像

Fig. 4 The color-corrected results using the improved shades-of-gray method

式中, 参数  $p$  为闵可夫斯基范数的阶. 根据特定的场景, 适当地调整参数  $p$  可达到最优白平衡. 本文中,  $p$  简单地取值为 2. 根据式 (9) 所示的对角变换, R 分量和 B 分量做对应的线性变换, G 分量保持原状. 同时, 白色响应值  $W_R$  和  $W_B$  也发生相应地调整,  $W_G$  保持不变.

如图 4 所示, 图 4(a) 在夜晚的雾中拍摄, 单色的钠气灯受大气中微小水滴的多次散射, 使场景的颜色严重偏黄色. 图 4(b) 和图 4(c) 分别为  $p = \infty$  和  $p = 2$  时用改进的灰色调算法获得的白平衡图像. 当  $p = \infty$  时, 改进的灰色调算法实际上将 R、G、B 颜色分量的白色响应值映射到灰度轴上.

### 2.3 后处理

在图像后处理阶段, 灰度级变换用于增强图像的亮度和对比度.

#### 2.3.1 直方图剪裁

由于光源具有高照度, 且成像传感器是线性感光, 光源的影响导致与光源照度差值较大的像素聚集在灰度级的暗端, 加之中间照度的缺失, 因而在直方图的中部易于产生较长的拖尾. 本文在有效像素的灰度级范围内确定直方图剪裁的上限, 截断预设比例的光源影响造成的拖尾像素, 增强图像的对比度. 需要强调的是, 在直方图中  $[0, W_c']$  范围内确定截断上限  $T_c$ , 而非在整个灰度级范围内. 其中,  $W_c'$  表示对角变换后的白色响应值.

若分别对 R、G、B 颜色通道进行剪裁, 则将导致颜色失真. 因此, 对 3 个颜色通道选取一致的上限  $M$  为

$$M = \max_{c \in \{R, G, B\}} \{T_c\} \quad (12)$$

式中,  $T_R$ 、 $T_G$ 、 $T_B$  分别为 R、G、B 颜色分量直方图中 0.5% 最亮像素的上限. 通过上限  $M$  截断图像中的光源或高光像素, 以及上述预设比例的拖尾像素. 同理, 截断 0.5% 最暗像素. 由于图像偏暗, 下限通常接近 0.

直方图剪裁,也就是分段线性灰度级变换,是将白平衡图像  $f'(x)$  的灰度级从  $[m, M]$  线性拉伸到  $[0, 1]$ , 用  $r(x)$  表示为

$$r(x) = k [f'(x) - m] \quad (13)$$

式中,  $m$  为下限,  $M$  为上限,  $k$  为线段  $[(m, 0), (M, 1)]$  的斜率.

### 2.3.2 伽马校正

幂次变换,也称为伽马校正,是可选操作,可表示为

$$o(x) = [r(x)]^\alpha \quad (14)$$

当  $\alpha = 1$  时,对图像不做任何处理;当  $\alpha < 1$  时,对图像进行非线性灰度级变换,增强图像中暗区域的对比度,但是降低亮区域的对比度.经直方图剪裁与伽马校正,图像中像素整体移向直方图的亮端.

## 3 实验结果与比较

本文的算法有两个参数:改进的灰色调算法中的  $p$  阶闵可夫斯基范数和幂函数中的指数  $\alpha$ . 在本文的实验中,根据经验确定参数  $p$  的取值;而参数  $\alpha$  的取值对实验结果并不敏感.为了验证所提出算法的性能,从定性和定量两个方面,对本文的算法与 NASA 的算法进行比较与分析,并给出在更多低照度图像上的增强结果.

图 5 显示了两幅低照度图像、NASA 算法的增强结果(参见文献 [5]),以及本文算法的增强结果.在图 5(a)中,左图为一幅夜晚监控图像,单色的钠气灯造成采集的图像偏色、色调单一.中间图像为 NASA 算法的结果.尽管同时增强了全局和局部的对比度,但是在颜色恒常性方面却存在严重的问题.右图为本文算法的结果,参数设置为  $p = 2$ ,  $\alpha = 0.8$ .在图 5(b)中,左图为一幅夜晚航拍图像,低照度导致采集的图像亮度不足、细节严重损失,几乎不包含可见的场景信息.中间图像为 NASA 算法的结果,图中存在明显的 Halo 效应及颜色失真.右图为本文算法的结果,可见,本文的算法有效地去除了偏色现象,展现了颜色的自然特性(注意树木和草地区域),并增强了亮度和对比度,明显改善了图像的视觉效果.

在大多数的实际应用中,真实图像或真实数据是未知的.由于没有真实图像可做参考,本文使用无参考客观质量评测方法来进行算法性能的评价与比较.图像视觉度增强算法主要涉及对比度和颜色两个方面的评价.直方图剪裁操作截断了一定比例的最亮和最暗像素,并使中间亮度像素占有整个灰度级,因而,增强图像具有高对比度.本文利用基于色调极坐标直方图的 2 个评测准则:集中性 (Concentration) 和离散度 (Scatter),对增强图像的颜色

进行评价.色调极坐标直方图用于度量图像的偏色和色调多样性<sup>[29]</sup>.色调用色度盘上关于红色轴的夹角来度量,色调值以角度表示的范围为  $[0, 360)$ .色调极坐标直方图在单位圆中表示图像中所有色调出现的概率.集中性定义为在极坐标表示下周期均值 (Circular mean) 对应的半径.若色调在圆中均匀分布,则周期均值不存在,半径为 0.集中性越大,图像色调分布越集中;反之,图像色调分布越分散.离散度定义为数据偏离周期均值的统计方差,表示色调以周期均值为中心的分布宽度.离散度越小,图像色调分布越窄;反之,图像色调分布越宽.高集中性和低离散度表明图像偏色、色调单一.

图 6 显示了图 5 中对应图像的色调极坐标直方图,为了直观地显示,色调用它代表的颜色绘制,黑实线对应的角度为周期均值.表 1 比较了在图 5 左图上本文算法和 NASA 算法的 2 个评测准则.可见,由于原图像偏色、色调单一,因而对应的离散度很低、集中性很高;与 NASA 算法相比,本文算法的增强图像有更高的离散度和更低的集中性.从图 6 和表 1 中可以看出,本文算法的增强图像色调更加自然、丰富.

表 1 图 6 所示的色调极坐标直方图的 2 个评测准则

Table 1 Two quality metrics of the hue polar histograms shown in Fig. 6

		离散度	集中性
夜晚	原图像	0.0173	0.0095
监控	NASA 算法的结果	0.7153	0.0022
图像	本文算法的结果	1.0333	0.0020
夜晚	原图像	0.0986	0.0039
航拍	NASA 算法的结果	0.7921	0.0021
图像	本文算法的结果	1.2092	0.0017

将本文的算法应用在大量低照度图像上,图 7 给出了部分实验结果.左列为原图像,右列为本文算法的增强图像,参数设置为  $p = 2$ ,  $\alpha = 1$ .大气粒子对不同波长可见光的散射强弱不同,因此,在一天中的不同时间,自然光表现出不同的颜色特性.图 7(a)左图的颜色偏蓝,而图 7(b)左图的颜色偏红.又由于自然光较弱,这两幅图像的亮度较低.室内人造光源的影响导致成像的颜色整体偏向光源的颜色.图 7(c)左图的颜色严重偏蓝,且亮度偏暗;图 7(d)左图的颜色偏黄色.从图 7 右列的增强图像可以看出,本文的算法取得了好的增强效果,有效地校正了图像的颜色、亮度和对比度,提高了图像的视觉度.

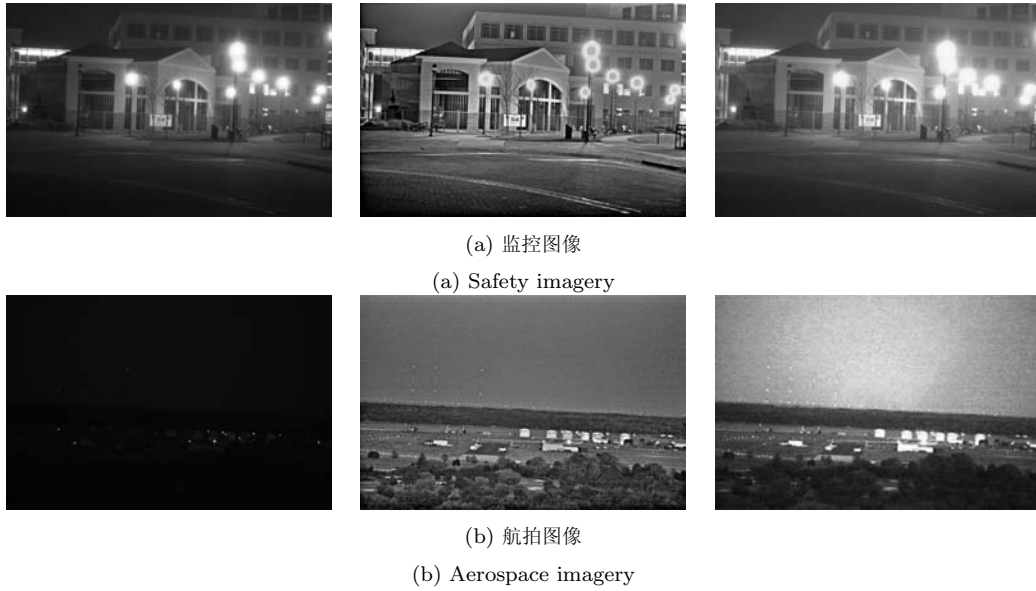


图 5 夜晚图像 (左列: 原图像; 中列: NASA 算法的结果; 右列: 本文算法的结果)  
 Fig. 5 Night-time images (Left: input images; Middle: NASA's results; Right: our results.)

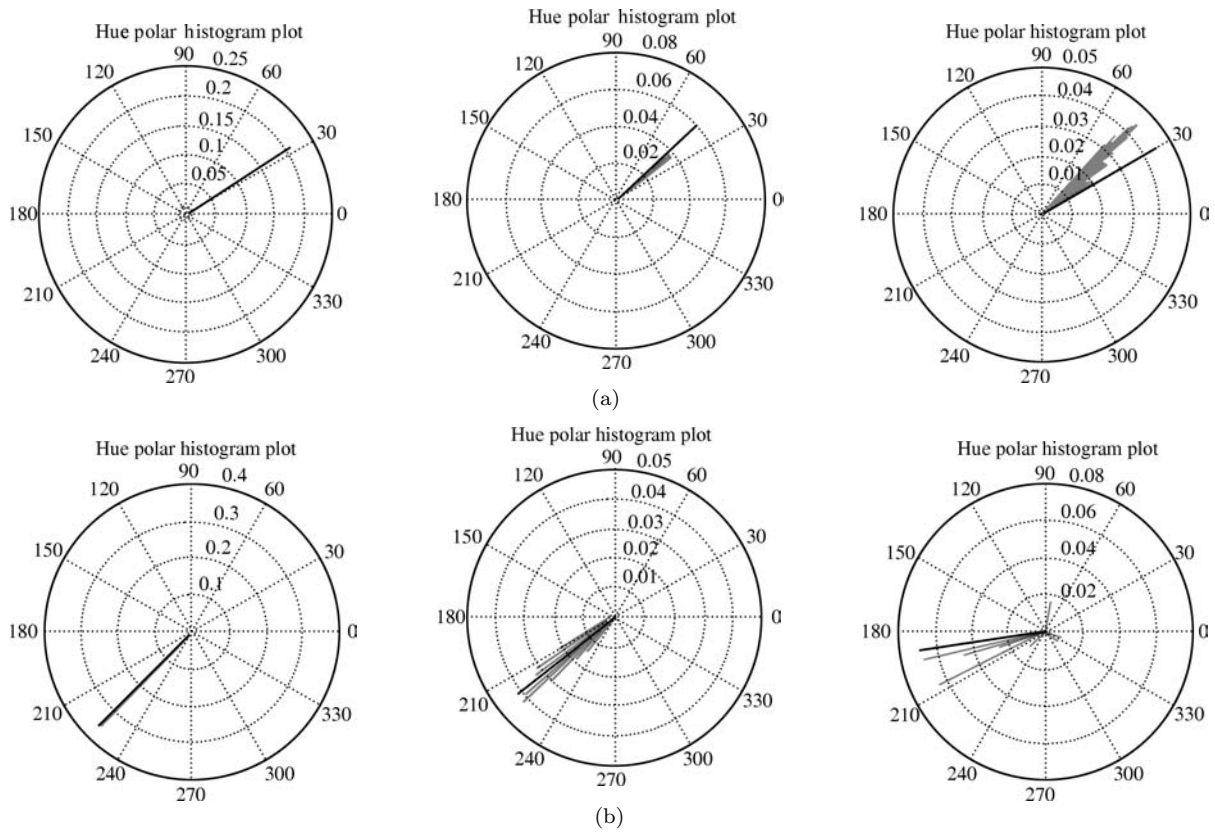


图 6 图 5 中对应图像的色调极坐标直方图 (色调用它代表的颜色绘制, 黑实线对应的角度为周期均值.  
 左列: 原图像; 中列: NASA 算法的结果; 右列: 本文算法的结果)

Fig. 6 The hue polar histograms corresponding to the images in Fig. 5 (Each hue is plotted with the color it represents, the solid black line on the unit disk represents the circular mean. Left: input images; Middle: NASA's results; Right: our results.)

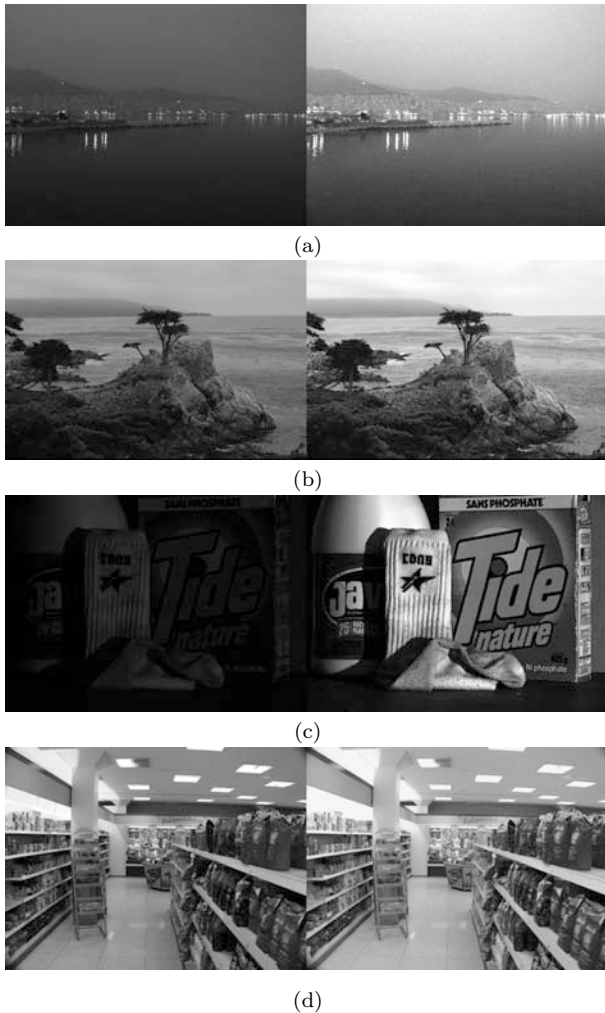


图7 本文算法的增强结果(左列:原图像;右列:增强图像)  
Fig. 7 Results of the proposed method  
(Left: un-enhanced images; Right: enhanced results.)

#### 4 结论

本文在像素有效集的基础上,提出了一种改进的灰色调算法,结合直方图剪裁,用于低照度图像的能见度增强。在彩色成像过程中,场景光源或高光的存在干扰了成像传感器对白色的正确响应,因而,首先对图像的白色响应值进行估计,并利用白色响应估计值构造像素有效集。在白平衡过程中,利用改进的灰色调算法来校正光照的颜色。在直方图剪裁过程中,在有效像素的灰度级范围内判定预设比例的拖尾像素。最后,利用基于色调极坐标直方图的2个无参考客观评测准则来定量评价算法的性能。实验结果表明本文的算法有效地增强了低照度图像的能见度,且不会产生 Retinex 算法所固有的灰化效应和 Halo 效应。后续的研究工作将进一步探讨改进的灰色调算法中参数自动选取方案。

#### References

- Vonikakis V, Andreadis I, Gasteratos A. Fast centre-surround contrast modification. *IET Image Processing*, 2008, **2**(1): 19–34
- Wang Shou-Jue, Ding Xing-Hao, Liao Ying-Hao, Guo Dong-Hui. A novel bio-inspired algorithm for color image enhancement. *Acta Electronica Sinica*, 2008, **36**(10): 1970–1973 (王守觉, 丁兴号, 廖英豪, 郭东辉. 一种新的仿生彩色图像增强方法. *电子学报*, 2008, **36**(10): 1970–1973)
- Ngo H, Tao L, Zhang M, Livingston A, Asari V. A visibility improvement system for low vision drivers by non-linear enhancement of fused visible and infrared video. In: *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. San Diego, USA: IEEE, 2005. 25–32
- Zhang X P, Sim T, Miao X P. Enhancing photographs with near infra-red images. In: *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Alaska, USA: IEEE, 2008: 1–8
- Woodell G A. Retinex image processing: improving the visual realism of color images [Online], available: <http://dragon.larc.nasa.gov/background/background.html>, July 25, 2010
- Agarwal V, Abidi B R, Koschan A, Abidi A. An overview of color constancy algorithms. *Journal of Pattern Recognition Research*, 2006, **1**(1): 42–54
- Land E H. The retinex. *American Scientist*, 1964, **52**(2): 247–264
- Land E H. An alternative technique for the computation of the designator in the retinex theory of color vision. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1986, **83**(10): 3078–3080
- 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
- Rahman Z, Jobson D J, Woodell G A. Multi-scale retinex for color image enhancement. In: *Proceedings of the International Conference on Image Processing*. Lausanne, Switzerland: IEEE, 1996. 1003–1006
- 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
- Rahman Z, Jobson D J, Woodell G A. Retinex processing for automatic image enhancement. *Journal of Electronic Imaging*, 2004, **13**(1): 100–110
- Barnard K, Funt B. *Investigations into multi-scale retinex. Colour Imaging: Vision and Technology*. New York: John Wiley and Sons, 1999. 17–36
- 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
- Rizzi A, Gatta C, Marini D. From retinex to automatic color equalization: issues in developing a new algorithm for unsupervised color equalization. *Journal of Electronic Imaging*, 2004, **13**(1): 75–84
- Rizzi A, Gatta C, Marini D. A new algorithm for unsupervised global and local color correction. *Pattern Recognition Letters*, 2003, **24**(11): 1663–1677



- 17 Cardei V, Funt B, Barnd K. White point estimation for uncalibrated images. In: Proceedings of the 7th Color Imaging Conference: Color Science, Systems and Applications. Scottsdale, USA: The Society for Imaging Science and Technology, 1999. 97–100
- 18 Buchsbaum G. A spatial processor model for object color perception. *Journal of Franklin Institute*, 1980, **310**(1): 1–26
- 19 Finlayson G D, Trezzi E. Shades of gray and colour constancy. In: Proceedings of the 12th Color Imaging Conference: Color Science, Systems and Applications. Scottsdale, USA: The Society for Imaging Science and Technology, 2004. 37–41
- 20 Van D W J, Gevers T, Gijsenij A. Edge-based color constancy. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2007, **16**(9): 2207–2214
- 21 Gijsenij A, Gevers T. Color constancy using natural image statistics and scene semantics. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2011, **33**(4): 687–698
- 22 Bianco S, Gasparini F, Schettini R. Region-based illuminant estimation for effective color correction. In: Proceedings of the 15th International Conference on Image Analysis and Processing. Vietri sul Mare, Italy: Springer, 2009. 43–52
- 23 Finlayson G D, Hordley S D, Tastl I. Gamut constrained illuminant estimation. *International Journal of Computer Vision*, 2006, **67**(1): 93–109
- 24 Gijsenij A, Gevers T, Van D W J. Generalized gamut mapping using image derivative structures for color constancy. *International Journal of Computer Vision*, 2010, **86**(2–3): 127–139
- 25 Finlayson G D, Hordley S D, Hubel P M. Color by correlation: a simple, unifying framework for color constancy. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2001, **23**(11): 1209–1221
- 26 Funt B V, Xiong W. Estimating illumination chromaticity via support vector regression. In: Proceedings of the 12th Color Imaging Conference: Color Science, Systems and Applications. Scottsdale, USA: The Society for Imaging Science and Technology, 2004. 47–52
- 27 Ebner M. Evolving color constancy. *Pattern Recognition Letters*, 2006, **27**(11): 1220–1229
- 28 Von K J. Influence of adaptation on the effects produced by luminous stimuli. *Sources of Color Science*. Cambridge: The MIT Press, 1970. 109–119
- 29 Chambah M. Reference-free image quality evaluation for digital film restoration. *Colour: Design and Creativity*, 2008, **4**(3): 1–16



**禹晶** 清华大学电子工程系博士研究生. 主要研究方向为模式识别与图像处理. 本文通信作者.

E-mail: j-yu08@mails.tsinghua.edu.cn

(**YU Jing** Ph.D. candidate in the Department of Electronic Engineering at Tsinghua University. Her research interest covers pattern recognition and image processing. Corresponding author of this paper.)



**李大鹏** 北京工业大学计算机学院硕士研究生. 主要研究方向为模式识别与图像处理.

E-mail: lidapeng@emails.bjut.edu.cn

(**LI Da-Peng** Master student at the College of Computer Science and Technology, Beijing University of Technology. His research interest covers pattern recognition and image processing.)



**廖庆敏** 清华大学教授. 1994 年获得法国 Rennes 大学信号处理与通信专业博士学位. 主要研究方向为图像和视频处理与分析、计算机视觉及其应用.

E-mail: liaoqm@sz.tsinghua.edu.cn

(**LIAO Qing-Min** Professor at Tsinghua University. He received his Ph.D. degree in signal processing and

telecommunications from the University of Rennes, France in 1994. His research interest covers image/video analysis, computer vision and its applications.)