

DOI: 10.7652/xjtuxb201410016

亮色分离的饱和图像校正方法

符均, 牟轩沁, 季文博

(西安交通大学电子与信息工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对图像饱和产生的偏色和细节丢失问题,提出了一种在 YC_bC_r 色彩空间进行的饱和图像校正方法。在校正时不仅考虑用邻域颜色去校正饱和像素,同时参考了该像素的不饱和通道信息。在单通道饱和像素校正中,设定校正点位于原饱和通道方向的延长线上,且为该线与邻域加权平均颜色组成的直线的最短距离点。由于校正是在 YC_bC_r 三维空间进行的,因此校正像素的亮度值被同时固定。在双通道饱和像素校正中,校正点颜色用邻域颜色相关性恢复,亮度值通过参考不饱和通道原始数值计算恢复。在 3 通道饱和像素校正时,对校正点颜色使用邻域恢复,而对亮度采用了梯度保持的方法。实验结果表明,该方法能更有效地校正 RAW 格式图像和处理后图像的颜色和亮度,并尽量保持不饱和区域的图像信息。

关键词: 饱和校正;色彩校正;亮色分离;彩色图像处理

中图分类号: TP391.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)10-0101-07

A Correction Method for Saturated Images Based on Separation of Luminance and Chrominance

FU Jun, MOU Xuanqin, JI Wenbo

(School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A correction method for saturation images in YC_bC_r color space is proposed to solve the problem of chrominance distortion and details lost caused by image saturation. Neighborhood's chrominances are used to correct the saturated pixel, and the unsaturated channel information of the pixel is used as a reference. The calibration point is located on the extension line of the original saturated straight, and has the shortest distance between the extension line and the line formed from weighted average of its neighborhood's chrominances, when 1-channel saturated pixels are corrected. Since the correction is performed in the YC_bC_r three-dimensional color space, the luminance of the corrected pixels can be fixed simultaneously. The chrominance of the saturated pixel is restored by the correlation of neighborhood chrominance, and the luminance of the saturated pixel is restored by computing original values of unsaturated channels, when 2-channel saturated pixels are corrected. The neighborhood recovery method is used to the chrominance of the saturated pixels, and the gradient maintenance procedure is employed to the luminance of the saturated pixels, when 3-channel saturated pixels are corrected. Experimental results show that the method is more effective in correcting chrominance and luminance of both RAW images and processed images, and maintains the image information of the unsaturated area as much as possible.

收稿日期: 2014-04-15。 作者简介: 符均(1975—),男,博士生;牟轩沁(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(90920003)。

网络出版时间: 2014-08-11 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20140811.1039.004.html>

Keywords: saturation correction; color correction; separation of luminance and chrominance; color image processing

计算机视觉装置在通过图像传感器拍摄照片或视频时,经常会出现过曝光和欠曝光,导致细节丢失和颜色偏差。过曝光会导致图像中出现饱和像素,这是由于场景光线强度动态范围远大于传感器动态范围。例如,在白天拍摄人脸,很容易出现过曝光^[1-2]。为了避免过曝光,可降低曝光强度,但这种操作会出现欠曝光^[3-4]。即使在背景很暗的环境下,有时也会出现局部过曝光现象^[5-6]。在不同设备上显示图像时,也会出现饱和问题^[7]。因此,有效处理过曝光图像饱和像素,恢复图像细节,对提高图像拍摄质量非常重要。在各类彩色成像设备中植入更合适的图像饱和校正算法,对于已捕获的过曝光图像恢复图像失真信息,都具有重要的现实意义。

针对饱和和像素问题,近些年已有许多不同校正方法出现^[8-13]。文献[8]提出在 RGB 色彩空间利用贝叶斯估计模型进行饱和校正,但难以校正严重饱和和区域。文献[9]根据 RGB 各通道邻域相关性提出了基于通道相对比值的校正方法,但难以校正全饱和,并且仅适合 RAW 格式图像校正。文献[10]根据图像中不同物体的颜色特征,在 RGB 色彩空间区分颜色簇进行校正,但对不同颜色簇的识别混淆会导致校正失败。文献[11-13]提出基于 CIELAB 非线性亮色分离色彩空间的集中校正。相对于前几种方法直接对 RGB 通道进行校正,这类方法将亮色度分开,对颜色的校正效果较好,对图像细节的处理也取得较好的效果。

本文针对 Bayer 模式的彩色图像传感器,研究过曝光校正问题^[14-15]。色彩的 3 个基本属性是亮度、色调和饱和度^[16],因此在亮色分离的色彩空间进行饱和校正更符合人眼主观感受。 YC_bC_r 色彩空间不是独立的色彩空间,而是 RGB 空间经线性变换得到的亮色分离^[17-18]的色彩空间。相对于在其他亮色分离的色彩空间而言,该变换具有计算复杂度低的特点。本文提出了一种在 YC_bC_r 色彩空间进行饱和和图像校正的方法,研究对象是已经成像的 RAW 格式或处理后的图像。方法分成饱和和像素判定、饱和像素校正和校正后量化 3 个主要步骤。不同于其他校正方法,校正颜色时利用 C_b 和 C_r 分量的空域相关性结合饱和和像素本身不饱和通道信息寻找最合适的校正后颜色。校正亮度时,算法利用校正后的颜色值和饱和和像素本身不饱和通道信息

寻找最合适的校正后亮度。校正完成后,提出一种亮度非线性量化的方法,使图像被恢复到可显示的 RGB 空间后,在恢复饱和和区域亮度细节的同时,可以尽量保持图像原本不饱和和区域的信息。

1 校正算法

1.1 饱和和像素判定

饱和和图像校正的第一步是判断存在曝光饱和的通道。一般都使用简单的阈值判定法。当传感器输出的 RGB 通道最大值是 255 时,通常采用 254 或 255 作为饱和判断阈值。考虑到接近最大值的非线性问题以及对非 RAW 格式图像进行白平衡、图像增强、伽马校正等处理,阈值可低至 230~240 之间^[9]。文献[11]提出了另一种结合亮度与色度判断饱和的方法,但仅适合判定颜色接近白色的饱和像素。为便于比较校正算法效果,本文采用了与文献[9]相同的饱和和像素判定方法,设定 RGB 3 个通道的饱和和阈值均为 235。

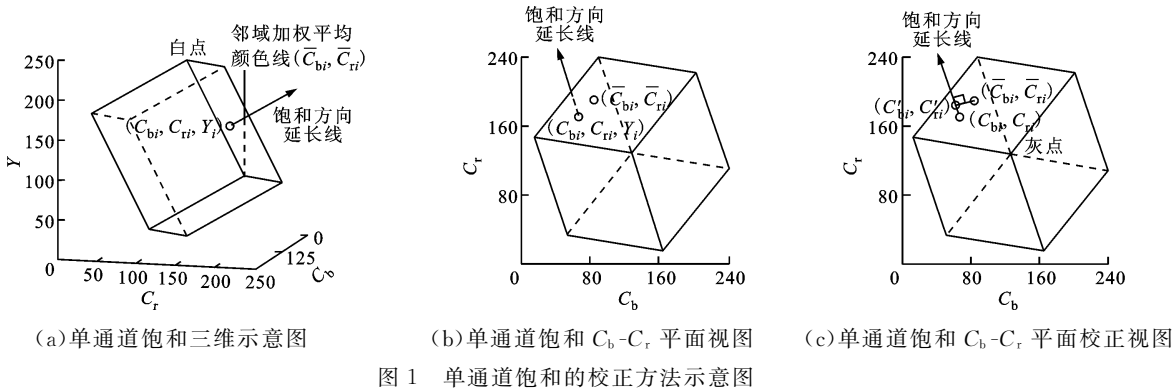
1.2 颜色校正

当物体受到光照射时,随着光强度和反射角度的变化,图像传感器的 RGB 3 个通道的数值都随之变化。当其中 1 个值增大到进入非线性区域后,单通道饱和就发生了。类似地,双通道和 3 通道饱和都有可能在实际成像过程中发生。在校正中,最基本目标是恢复因饱和而导致的颜色失真,随后是恢复亮度失真丢失的细节和纹理。在 YC_bC_r 空间中,亮色是基本分离的。因此,首先将图像从 RGB 空间线性地映射到 YC_bC_r 空间,此后的讨论和计算都在 YC_bC_r 空间中进行。

1.2.1 单通道饱和和颜色校正 当图像传感器的 1 个通道进入非线性区域时,另外 2 个通道仍处于正常的线性状态。不失一般性,假设部分图像像素的 R 通道饱和,此时单纯地增加饱和和区域的 R 到合适的数值并扩展图像的动态范围即可恢复图像的真实颜色。

设像素 i 存在单通道饱和, i 的色度空间坐标为 (C_{bi}, C_{ri}, Y_i) , N_i 为 i 的空域 3×3 邻域, N_i 中所有像素的颜色分量加权平均值在 C_b - C_r 平面的投影坐标为 $(\overline{C_{bi}}, \overline{C_{ri}})$,校正后的像素坐标为 (C'_{bi}, C'_{ri}, Y'_i) 。

在 RGB 色彩空间中,单纯增加 R 分量,可得到一条沿饱和和方向延长的射线。将该射线映射到 YC_bC_r 色彩空间,仍然是一条射线,如图 1 所示。图



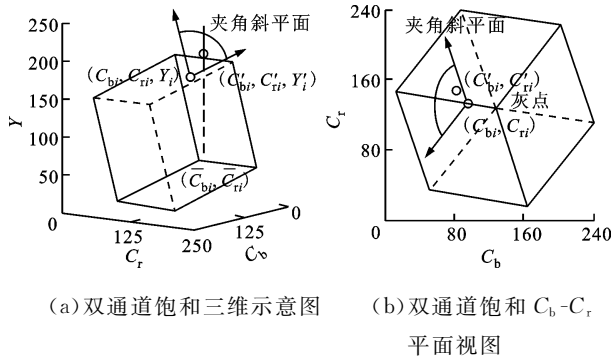
1a 中的平行六面体是 YC_bC_r 空间的可显示边界。如果扩大图像的动态范围,校正结果就在这条射线上的某一点处。为了获得校正后的 R 值所落在射线上的准确位置,需要邻域颜色信息来辅助确定。单通道饱和和像素的颜色应接近最相关的邻域颜色。因此,构建 $(\overline{C_{bi}}, \overline{C_{ri}})$ 方程如下

$$\overline{C_{bi}} = \frac{\sum_{j \in N_i} w_{ij} C_{bj}}{\sum_{j \in N_i} w_{ij}} \tag{1}$$

$$\overline{C_{ri}} = \frac{\sum_{j \in N_i} w_{ij} C_{rj}}{\sum_{j \in N_i} w_{ij}} \tag{2}$$

式中:权重 w_{ij} 描述了像素 i 和邻域像素 j 的相似程度,其定义为 i 与 j 的 Y 、 C_b 、 C_r 3 个分量空间距离的高斯函数乘积。饱和像素邻域颜色的加权平均值没有包含亮度信息,在 YC_bC_r 空间中为一条垂直于 C_b - C_r 平面的直线,此时射线上与直线 $(\overline{C_{bi}}, \overline{C_{ri}})$ 距离最近的点即为校正点,如图 1c 所示。由此计算得到像素 i 的 C_b 和 C_r 分量的校正值。

1.2.2 双通道饱和和颜色校正 当图像的双通道饱和和失真时,饱和和双通道的校正值应大于原值,而不饱和和通道的值未失真。置信不饱和通道数据值,则校正值可能出现的区域在 YC_bC_r 空间构成如图 2 所示的夹角斜平面内。由于双通道饱和和像素颜色信息丢失太多,本文采用邻域加权颜色来覆盖饱和点的



颜色。

由于双通道饱和和像素的邻域一般均为饱和像素,因此本文采用能量最小化方法来约束校正后的颜色。设定双通道饱和和邻域校正颜色应符合能量最小化原则

$$\epsilon_{C_D} = \sum_{i \in D} \left\| C'_i - \sum_{j \in N_i} w_{ij} C'_j \right\|_2^2 \tag{3}$$

式中: ϵ_{C_D} 表示颜色能量; $C'_i = (C'_{bi}, C'_{ri})$; $C'_j = (C'_{bj}, C'_{rj})$; D 为双通道饱和和像素构成的集合。

1.2.3 3 通道饱和和颜色校正 当图像 3 个通道都饱和时,亮度和颜色信息都严重失真。因此,用双通道饱和和颜色校正的方法来恢复颜色信息,3 通道饱和和邻域校正颜色同样符合式(3)所示的能量最小化原则。

1.3 亮度校正

颜色校正完成后,图像的色调和饱和度信息得到恢复,下一步要进行的是对亮度的校正。对于单、双与 3 通道饱和,由于饱和像素丢失的亮度信息不同,因此校正方法也不同。

1.3.1 单通道饱和和亮度校正 对于单通道饱和,当得到像素 i 的 C_b - C_r 平面投影坐标 (C'_{bi}, C'_{ri}) 后,由于校正后的像素坐标位于 YC_bC_r 三维色彩空间的一条射线上, Y 分量校正值可由 i 所在的直线方程得到。

1.3.2 双通道饱和和亮度校正 对于双通道饱和,当得到像素 i 的 C_b - C_r 平面投影坐标 (C'_{bi}, C'_{ri}) 后, Y'_i 位于图 2 所示的夹角斜平面与直线 (C'_{bi}, C'_{ri}) 的交点上。从饱和点出发,分别沿着 2 个饱和方向选择饱和和区域两边边界上的 3 点来构成饱和方向的延伸平面,即可求解得到 Y 的校正值 Y'_i 。

1.3.3 3 通道饱和和亮度校正 对于 3 通道饱和区域,由于该区域亮度细节信息丢失非常严重,除当前已失真图像外没有其他信息的情况下,难以找到普适的方法用于还原出真实的亮度信息,所以本文采

用保留原始图像 Y 通道梯度值的方法来保留尽可能多的信息。设 T 为 3 通道饱和像素的集合, $\nabla Y'_i$ 为校正后图像 Y 通道的梯度, ∇Y_i 为原始图像中 Y 通道的梯度, (x, y) 为任一像素在图像中的位置坐标。此时亮度的计算方法为求解使下式的能量函数取最小值

$$\epsilon_{Y_T} = \sum_{i \in T} \| \nabla Y'_i - \nabla Y_i \|_2^2 \tag{4}$$

梯度计算采用后向差分

$$\begin{aligned} \nabla Y(x, y) = & (Y(x, y) - \\ & Y(x - 1, y), Y(x, y) - Y(x, y - 1)) \end{aligned} \tag{5}$$

1.4 图像非线性量化

在饱和图像校正过程中,首先校正颜色。当颜色被校正后,饱和像素色彩的饱和度增加,即使不校正亮度,图像的动态范围已经超出 RGB 色彩空间的可显示范围^[19]。此时,图像的颜色得到恢复,与颜色相关的细节也得到恢复。当亮度校正后,图像的动态范围进一步扩大,图像的亮度和与亮度相关的细节得到恢复。为了能将图片显示出来,需要对图像进行量化。线性量化会造成原图像的低亮度区域变得更暗,虽然饱和区域的信息得到恢复,但是不饱和区域的信息会大量丢失。寻找合适的量化方法,是校正方法过程中的重要环节。

本文尝试采用新的非线性量化方法。构造针对校正后亮度的量化公式如下

$$\begin{aligned} Y''_i = & (Y_i + \alpha(Y'_i - Y_i))^\gamma \cdot \\ & (\max(Y_i + \alpha(Y'_i - Y_i)))^{1-\gamma} \end{aligned} \tag{6}$$

式中: Y''_i 表示像素 i 经量化后的亮度; α, γ 表示非线性因子,值域均为 $(0-1]$ 。 α 用于缓和校正后产生的高亮度,限制图像的动态范围, γ 用于提升低亮度区域亮度。经过试验,对于绝大部分图像,可选取 $\alpha = 0.5, \gamma = 0.9$ 。

最后,图像数据由 YC_bC_r 空间映射到可显示的 RGB 色彩空间,完成整个图像饱和校正过程。

2 实验结果和讨论

本文从饱和校正的基本目的出发,采用了基于传感器非线性饱和阈值 235 和传感器溢出阈值 254 两种常用固定阈值下的 4 个客观评价指标:①饱和像素平均亮度比 R_l ,即饱和像素校正后平均亮度与原始图像饱和像素平均亮度的比值,体现了图像亮度的恢复程度,该值小于 1 表示亮度校正有效,但是该值过低表示不饱和区域亮度过暗;②饱和像素平均饱和度比 R_c ,即饱和像素校正后平均饱和度与原始图像饱和像素平均饱和度的比值,体现了图像颜色的恢复程度,该值大于 1 表示颜色校正有效;③图像平均亮度除以图像平均饱和度与原始图像比 R_r ,即设校正后图像平均亮度除以平均饱和度的值为 R_d ,原始图像平均亮度除以平均饱和度的值为 R_l ,则 $R_r = R_d/R_l$, R_r 体现了结果图像与原始图像的相似程度,该值越接近 1 表明 2 幅图像越接近,校正过程对图像整体影响越小,校正效果越自然;④饱和像素占图像点数百分比 R_p ,即在给定阈值下饱和像素个数占全体像素的百分比,结果体现了图像校正效果的合理性,校正后该百分比应大幅下降。

表 1 列出了本文方法与其他几种方法基于图 3a 的客观比较结果。采用本文方法 R_l 为 0.84,显示了亮度校正的有效性,并且保持了不饱和区域的亮度。文献[12]的方法会导致不饱和区域亮度偏暗, R_l 只有 0.65。在 235 阈值情况下,本文 R_c 为 1.16,表明本方法进行了有效的颜色校正,但略逊于文献[12-13]方法。本文方法的 R_r 最接近 1,表明本文方法与原始图像的整体效果最接近,校正效果最自然。本文 R_p 接近于 0,表明本方法有效消除了原始图像中的饱和现象。总体观察客观评价指标,本文方法对原始图像饱和像素亮度和颜色校正有效,对原始图像不饱和像素信息影响有限,整体校正效果自然。

图 3 给出了不同算法饱和校正效果对比情况。

表 1 饱和阈值为 235 和 254 时几种方法的校正结果对比

方法	R_l		R_c		R_r		R_p	
	235	254	235	254	235	254	235	254
原始图像	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	24.465	9.391
文献[9]	0.84	0.82	0.87	1.01	1.09	1.09	1.300	0.000
文献[12]	0.65	0.65	1.25	1.41	0.64	0.64	0.149	0.022
文献[13]	0.92	0.90	1.25	1.39	0.92	0.92	17.903	5.365
本文方法	0.84	0.84	1.16	1.34	0.98	0.98	5.095	0.004

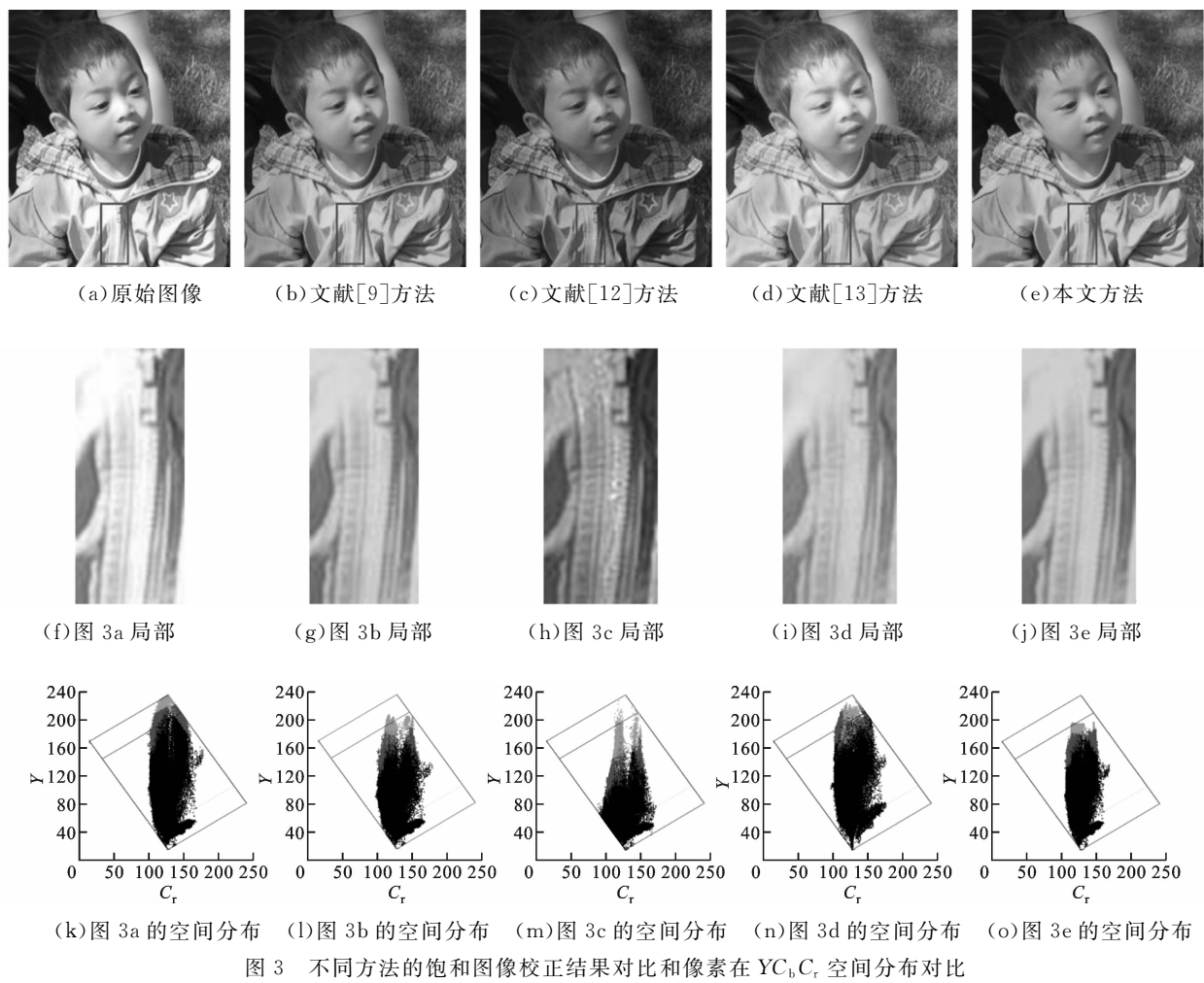


图 3 不同方法的饱和图像校正结果对比和像素在 $YCbCr$ 空间分布对比

其中图 3k~3o 给出了不同方法的结果在 C_b-C_r 色彩空间的像素分布情况,图中黑点表示未饱和像素,深灰色点表示单通道饱和像素,浅灰色点表示双通道饱和和 3 通道饱和像素。对图 3a 的几种校正算法比较可知:文献[12]的方法恢复出了更多的细节,但是难以确定恢复出细节的正确性,如图 3l 中的白点区域,同时低亮度区域信息损失较多;文献[13]方法同时恢复了高亮度区域和低亮度区域的颜色,但图像亮度高于原始图像;本文方法略优于文献[9]方法结果,整体效果自然。

图 4 给出了文献[9]方法与本文方法饱和校正效果对比情况,从图中可以看出,2 种方法都有效地校正了人物的脸、脖子、胳膊、短袖和后景中的椅子在内的饱和像素。但当饱和像素出现在色彩边缘区域时,如图 4a 标记出的 2 个椭圆圈内,文献[9]的方法受邻域影响偏色严重。图 4h 显示人物脖子和脖子下面的白色领口颜色受到短袖的影响导致偏蓝色,图 4e 和图 4h 显示人物胳膊上的白色袖口颜色受到

胳膊的影响导致偏红色。本文方法则未出现明显偏色,在恢复脖子处饱和像素颜色的同时,没有过多引起原本就是白色领口和袖口的颜色偏红色或者偏蓝色。这主要得益于本文的邻域颜色加权算法和能量最小化原则,当饱和像素出现在图像中不同区域的边缘时,在未进行边缘提取或者图像分割的情况下,也能有效降低图像其他区域对校正目标的影响。

3 结 语

本论文提出了一种在 $YCbCr$ 色彩空间进行的饱和图像校正算法。该算法在校正时保留了原图像饱和点中的不饱和 RGB 通道信息,亮度和颜色校正分开完成。该方法不仅适用于 RAW 格式图像,也适用于处理后的图像。实验结果表明,该方法相比于其他方法能更好地恢复图像饱和区域的颜色和亮度,并尽量保持不饱和区域的图像信息。下一步,作者将参考人眼对色彩的宽容量并引入图像模糊度进行校正,以期更符合人眼视觉的饱和校正效果。

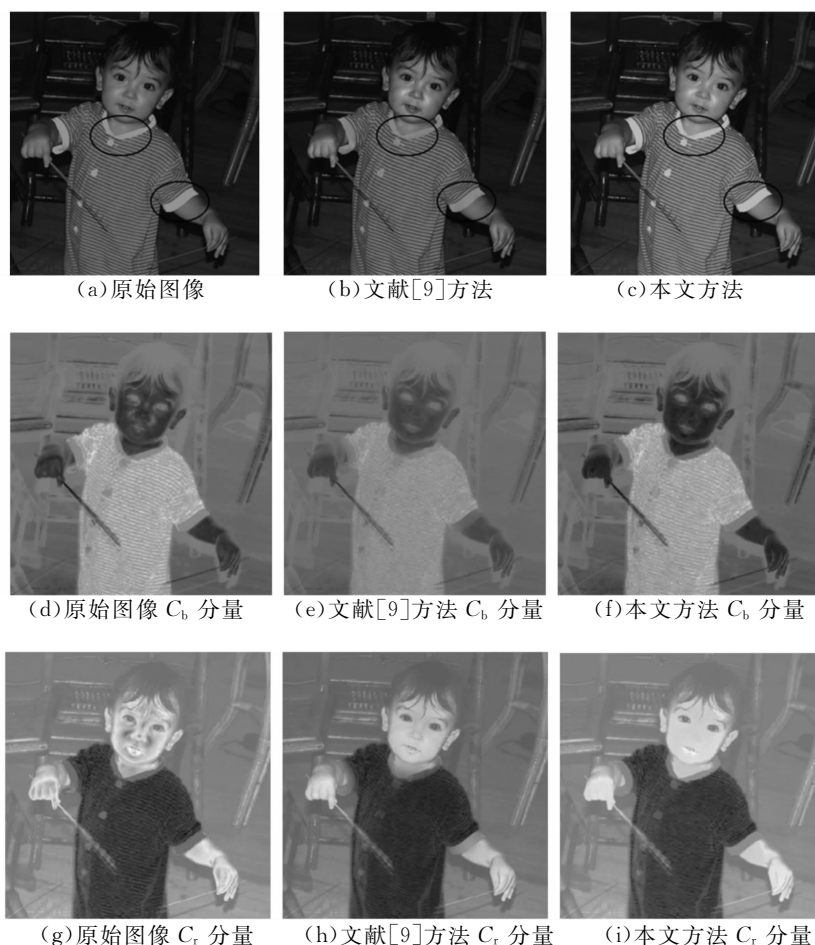


图4 文献[9]方法与本文方法的饱和校正结果对比

参考文献:

- [1] KUNO T, SUGIURA H, MATOBA N. A new automatic exposure system for digital still camera [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 1998, 44 (1): 192-199.
- [2] ADAMS J, PARULSKI K, SPAULDING K. Color processing in digital cameras [J]. IEEE Micro, 1998, 18 (6): 20-30.
- [3] WANG Y, ZHUO S, TAO D, et al. Automatic local exposure correction using bright channel prior for under-exposed images [J]. Signal Processing, 2013, 93(11): 3227-3238.
- [4] JIA J, SUN J, TANG C K, et al. Bayesian correction of image intensity with spatial consideration [C] // Computer Vision-ECCV 2004. Heidelberg, Germany: Springer-Verlag, 2004: 342-354.
- [5] ZHANG J, CHEN X H, ZHAO Y, et al. An efficient and scalable image filtering framework using VIPS fusion [J]. Computer Graphics Forum, 2013, 32(7): 391-400.
- [6] 陈继东, 宣国荣. 交通标志灯色饱和图像的色彩校正 [J]. 红外与激光工程, 2003, 32(3): 313-316.
- [7] 王志国, 梁志虎, 刘纯亮. 一种应用于 AC PDP 的反 gamma 校正与动态对比度增强相结合的新方法 [J]. 真空科学与技术学报, 2009, 29(6): 700-703.
- [8] WANG Zhiguo, LIANG Zhihu, LIU Chunliang. Combining inverse gamma correction with dynamic contrast ratio enhancement for AC plasma-display-panel [J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2009, 29(6): 700-703.
- [9] ZHANG X, BRAINARD D H. Estimation of saturated pixel values in digital color imaging [J]. Journal of the Optical Society of America: A Optics, Image Science, and Vision, 2004, 21(12): 2301-2310.
- [10] MASOOD S Z, ZHU J, TAPPEN M F. Automatic correction of saturated regions in photographs using cross-channel correlation [J]. Computer Graphic Forum, 2009, 28(7): 1861-1869.
- [11] ELBOHER E, WERMAN M. Recovering color and details of clipped image regions [C] // 2010 IADIS International Conference on Computer Graphics, Visual-

- ization, Computer Vision and Image Processing. Lisbon, Portugal: IADIS Press, 2010: 124-132.
- [11] GUO D, CHENG Y, ZHUO S, et al. Correcting over-exposure in photographs [C]// Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2010: 515-521.
- [12] SHEN Y, MO R, ZHU Y, et al. Over-exposure image correction with automatic texture synthesis [C]// Proceedings of 2011 4th International Congress on Image and Signal Processing. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2011: 794-797.
- [13] HOU L, JI H, SHEN Z. Recovering over/under-exposed regions in photographs [J]. SIAM Journal on Imaging Sciences, 2013, 6(4): 2213-2235.
- [14] BAYER B E. Color image array: USA, 3917065 [P/OL]. (1976-07-20)[2014-02-07]. <http://patentimages.storage.googleapis.com/pdfs/US3917065.pdf>.
- [15] 朱波, 汶德胜, 王飞, 等. 应用字典学习算法改善 Bayer 格式图像彩色恢复效果 [J]. 电子与信息学报, 2013, 35(4): 812-819.
- ZHU Bo, WEN Desheng, WANG Fei, et al. Improvement of Bayer-pattern demosaicking with dictionary learning algorithm [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2013, 35(4): 812-819.
- [16] 威捷, 汤顺青, 朱正芳. 现代颜色技术原理及应用 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2007: 31-101.
- [17] AGARWAL V, ABIDI B R, KOSCHAN A, et al. An overview of color constancy algorithms [J]. Journal of Pattern Recognition Research, 2006, 1(1): 42-54.
- [18] FINLAYSON G D, HORDLEY S D, HUBEL P M. Color by correlation: a simple, unifying framework for color constancy [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2001, 23(11): 1209-1221.
- [19] 张尚伟, 曾平, 罗雪梅, 等. 具有细节补偿和色彩恢复的多尺度 Retinex 色调映射算法 [J]. 西安交通大学学报, 2012, 46(4): 32-37.
- ZHANG Shangwei, ZENG Ping, LUO Xuemei, et al. Multi-scale Retinex with color restoration and detail compensation [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2012, 46(4): 32-37.

(编辑 刘杨)

(上接第 100 页)

- LI Daxin, ZHANG Xiumian. The present situation and trend of development of mould technology [J]. Die and Mould Manufacture, 2005(2): 1-4.
- [5] 谢飞, 叶雪梅, 程健, 等. 工模具钢的一种节能高效表面渗硼技术 [J]. 常州大学学报: 自然科学版, 2012, 24(2): 1-5.
- XIE Fei, YE Xuemei, CHENG Jian, et al. Energy-saving and highly-efficient pack boriding technology for tool mould steels [J]. Journal of Changzhou University: Natural Science Edition, 2012, 24(2): 1-5.
- [6] 邢志松, 王宝平. 渗硼工艺试验及应用 [J]. 金属热处理, 2013, 38(8): 99-102.
- XING Zhisong, WANG Baoping. Boronizing test and its application [J]. Heat Treatment of Metals, 2013, 38(8): 99-102.
- [7] XIE Fei, SUN Li, PAN Jianwei. Characteristics and mechanisms of accelerating pack boriding by direct current field at low and moderate temperatures [J]. Surface and Coatings Technology, 2012, 206(11/12): 2839-2844.
- [8] 史月丽, 葛长路, 王温银. 盐浴共晶化渗硼的研究 [C]//第八次全国热处理大会论文集. 北京: 中国工程热力学学会, 2003: 277-280.
- [9] GE C L, YE R C. Research on self-propagating eutectic boriding [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 124(1/2): 14-18.
- [10] OLIVEIRA C K N, CASTALETTI L C, LOMBARDI N A, et al. Production and characterization of boride layers on AISI D2 tool steel [J]. Vacuum, 2010, 84: 792-796.
- [11] 郝少祥, 王宇平, 陈静. 稀土对 Cr12MoV 钢渗硼层组织和性能的影响 [J]. 河南科学, 2006, 24(1): 20-22.
- HAO Shaoxiang, WANG Yuping, CHEN Jing. Effect of rare earth on microstructure and properties of boronizing layer [J]. Henan Science, 2006, 24(1): 20-22.
- [12] 李亚波, 王福明, 朱宝晶. 稀土元素在铁素体不锈钢中的作用和应用前景 [J]. 特殊钢, 2008, 29(3): 39-41.
- LI Yabo, WANG Fuming, ZHU Baojing. Application prospect and effect of rare earth elements in ferritic stainless steels [J]. Special Steel, 2008, 29(3): 39-41.
- [13] 谢敬佩, 王文焱, 李继文, 等. 耐磨奥氏体锰钢 [M]. 北京: 科学出版社, 2008: 105.
- [14] 戴乐, 潘罗坤, 张永洋. 药芯焊丝形成 WC 增强铁基耐磨堆焊层研究 [J]. 热加工工艺, 2011, 40(11): 35-39.
- DAI Le, PAN Luokun, ZHANG Yongxiang. Study on WC reinforced iron matrix wear resistance surfacing layer manufactured by flux-cord wires [J]. Hot Working Technology, 2011, 40(11): 35-39.

(编辑 刘杨)