

融合多颜色空间信息的彩色图像色差校正算法

唐佳林^{1,3} 张冲^{1,2} 郭岩锋³ 苏秉华^{1,2} 苏清朗³

1 北京理工大学珠海学院 广东 珠海 519088

2 北京理工大学光电学院 北京 100081

3 澳门城市大学数据科学研究院 澳门

(01068@bitzh.edu.cn)

摘要 智能相机在获取图像时,由于成像条件的限制,容易导致彩色图像的颜色与物体本身的颜色偏差较大;为了减少两者的偏差,提高颜色的还原性,文中提出了一种新的颜色校正方法。该方法先在 RGB 颜色空间中以最小二乘法求出最逼近的 Color Matrix,再在 L^*ab 颜色空间中对其进行优化。通过该方法获得的颜色矩阵,改进了在 RGB 空间中以穷举方式逼近目标值的方式。为验证新算法的有效性,以标准 D65 光源为照明光源,Color Check24 色卡/ColorCheck+Vectorscope 为实验对象,来衡量校正结果。实验结果表明,色块区域使用新方法后的色彩均衡效果优于传统的颜色矩阵计算方法。

关键词: 最小二乘法;颜色矩阵;颜色偏差;颜色校正;色彩均衡;OSID

中图法分类号 TP391

Color Difference Correction Algorithm Based on Multi Colors Space Information

TANG Jia-lin^{1,3}, ZHANG Chong^{1,2}, GUO Yan-feng³, SU Bing-hua^{1,2} and SU Qing-lang³

1 Zhuhai College, Beijing Institute of Technology, Zhuhai, Guangdong 519088, China

2 School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

3 Institute of Data Science, City University of Macau, Macau, China

Abstract The color of the color image and the object itself tends to deviate greatly when the image is acquired by the smart camera, due to the limitation of imaging conditions. In this paper, a new color correction method was proposed to reduce the deviation and improve the color reducibility. In this method, the most approximate Color Matrix is obtained by least square method in RGB color space, and then optimized in L^*ab Color space. The color matrix obtained by this method improves the method of approximating the target value by exhaustive method in RGB space. In order to verify the effectiveness of the new algorithm, the standard D65 light source is used as the lighting source, Color Check24/ColorCheck+Vectorscope is used as the experimental object and the measurement correction result was obtained. Comparison experiments show that the color balance effect of the new method is better than that of the traditional color matrix calculation method.

Keywords Least square method, Color matrix, Color deviation, Color correction, Color equalization, OSID

智能相机不是一台简单的照相机,而是一个微型的嵌入式机器视觉系统,一般由光源、CCD 或 CMOS 相机、图像采集卡、图像处理软件以及一台 PC 机构成。由于智能相机应用了最新的 DSP、FPGA 及大容量存储技术,其智能化程度不断提高,可满足多种机器视觉的应用需求^[1]。随着 CCD 或 CMOS 分辨率的不断提高,智能相机的成像质量也在不断提升。然而,由于光源、图像采集设备和图像显示器等因素,使得智能相机在获取图像时存在色彩还原性差的问题。因此,在各种光照条件下如何描述物体本征颜色,最后使得输出图像的颜色信息更加接近于物体本身颜色信息的颜色校正技术,具有重要的研究意义。

在已有的研究中,颜色校正方法主要可分为基于映射的颜色校正方法、基于光谱反射率还原的颜色校正方法和基于图像分析的颜色校正方法等 3 类^[2-3]。其中,基于映射的颜色

校正方法,可直接建立相关颜色空间与标准颜色空间关联的优势,在多种数字图像设备的颜色校正中均获得了广泛的实际应用^[6],例如显示器、数码相机、智能相机等。该方法可进一步划分为传统的矩阵法、人工神经网络法、线性回归法、非线性回归法和如今的线性 LASSO 与非线性 LASSO 回归法等。其中,颜色矩阵的计算算法是该类校正方法的关键部分。

由于使用传统的颜色矩阵计算方法计算的 Color Matrix 值与景物本身的颜色目标值还存在较大的偏差,因此本文将融合 L^*ab 颜色空间信息对该算法进行改进,并验证改进算法的有效性。

1 颜色矩阵计算

由于颜色校正(Color Correction)主要通过颜色矩阵(Color Matrix)实现,因此计算最优的颜色矩阵是主要的任务。

本文已加入开放科学计划(OSID),请扫描上方二维码获取补充信息。

基金项目:广东省青年创新人才项目(2016KQNCX203,2018KQNCX346)

This work was supported by the Guangdong Youth Innovative Talents Project (2016KQNCX203,2018KQNCX346).

通信作者:郭岩锋(kingcn@msn.com)

1.1 Color Matrix 校正颜色的原理

颜色校正主要通过颜色矩阵(Color Matrix)模块来执行。其实质如式(1)所示:

$$\begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{OFSR} & \text{CMA11} & \text{CMA12} & \text{CMA13} \\ \text{OFSG} & \text{CMA21} & \text{CMA22} & \text{CMA33} \\ \text{OFSB} & \text{CMA31} & \text{CMA22} & \text{CMA33} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 \\ R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中,颜色校正模块使用一个 3×4 的颜色变换矩阵作用于输入图像的 RGB 之后,输出新的 R', G', B' 来达到颜色校正的目的。然后用 ISP 后续的 Hue, Saturation, Brightness, Contrast 等模块对结果进行处理,以便达到精确的校正结果,具体如图 1 所示。

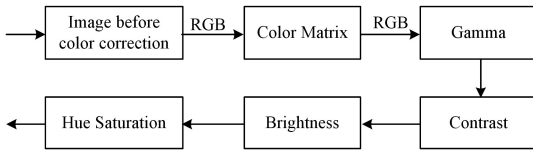


图 1 颜色校正的相关模块和顺序

Fig. 1 Relevant modules and sequence of color correction

在实际执行的色彩校正任务中,它是目前的数据处理(data path)任务的简化流程。

在 data 中,对最终输出图像颜色影响大的模块有:Black Level, AWB, Color Matrix, Gamma, Hue, Saturation, Brightness, Contrast 等。这些模块对最终颜色的影响程度是不同的,为达到好的颜色效果,有些模块的参数可以随便设定(如 Hue, Saturation, Brightness, Contrast 等),而有些模块的参数虽然对最终结果有很大影响,但其有各自的调整原则,不能随便设定(如 Black Level, AWB, Gamma 等)。这些都给整个 ISP 参数的优化带来了较大的难度。

1.1.1 Black Level 对校正图像的影响

由文献[7]可知,Black Level 是指无光线时,相机输出的红、绿、蓝三路电平一致,以保证图像的黑色部分无彩色。传感器输出的数据不全为 0,这是因为 R, G, B 3 个分量各有不等的灰度信息存在。若不校准,当传感器输出数据时,这些偏差则会叠加在上面,进而会降低图像饱和度。

1.1.2 AWB 对校正图像的影响

AWB(自动白平衡)的目的是确保在不同色温光源下拍摄的图像颜色的稳定性^[7],即降低外界光源对物体本来颜色的影响^[7],可通过修改 R_{gain} 和 B_{gain} 来调节图像的白平衡。在做颜色校正时,一般始终假设 AWB 已经确定校正了颜色平衡。因此,在进行 Color Correction 时,需要手工设置白平衡参数。将镜头对准白纸,打开 AWB,等 AWB 稳定后,记录下此刻的白平衡参数。其中, R_{gain} 和 B_{gain} 各自的表达式如式(2)所示:

$$\begin{cases} R_{\text{gain}} = \frac{\overline{G}}{R} \\ G_{\text{gain}} = 1 \\ B_{\text{gain}} = \frac{\overline{G}}{B} \end{cases} \quad (2)$$

1.1.3 Gamma 对校正图像的影响

任何低于 16 位的图像都会受 Gamma 的影响^[8-9],且 Gamma 编码图像中的像素实际上是非线性的。其目的是为

了补偿监视器的非线性响应,完成的是 linear RGB 空间向 RGB 空间的转变。目前,常用的 Gamma 曲线的常用形式如式(3)所示:

$$y = \begin{cases} 4.5x, & x \leq 0.018 \\ 1.099x^\gamma - 0.099, & x > 0.018 \end{cases} \quad (3)$$

$$\gamma = 0.45$$

曲线的形式如图 2 所示。

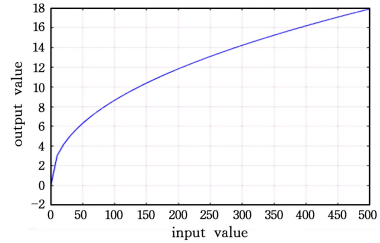


图 2 Gamma 曲线

Fig. 2 Gamma curve

1.1.4 Hue, Saturation, Brightness, Contrast 等对校正图像的影响

Hue, Saturation, Brightness, Contrast 等是 ISP 后续图像增强的主要手段,每一个模块参数的调整都会对图像的 RGB 值产生影响。虽然这些调整对 RGB 值产生的是整体的影响,但是调整后的效果也是较大程度地改变 RGB 数值,在用较严格仪器测量最终颜色的准确性时,这些参数的设置也会对结果产生较大影响。

1.1.5 Color Matrix

Color Matrix 是颜色校正的主要手段,上文已经讲述了 Color Matrix 校正颜色的原理和计算方法,Color Matrix 参数对 Color Correction 的最终效果有决定性影响,是颜色校正效果的决定性因素。

1.2 传统的颜色矩阵计算算法

传统的颜色矩阵计算方法主要是,为降低对手工设置每个图像颜色色块的权重的要求,减轻调试人员的负担,以穷举的方式(把颜色矩阵中所有行的数据列出来,再进行逐行研究),找到一组在 RGB 空间数值上最逼近的 Color matrix,并要求 Color matrix 每行的累加值接近 1,最难的穷举偏移量默认为 0。

1.3 传统颜色矩阵计算算法的缺点

在 RGB 空间中,以手工设置每个区域的权重(默认为等权重)的方式,会使得权重设定的难度偏大;穷举的方式使得最终计算的 Color Matrix 与景物本身的颜色值存在较大的偏差。

1.4 新的颜色矩阵计算算法

根据传统方法的缺陷,本文提出了先采用最小二乘法求出 RGB 空间中最逼近的 Color Matrix 值,然后求出 L^*ab 空间中优化计算结果的改进方法。

在最小二乘法求出 RGB 空间中最逼近的 Color Matrix 值的过程中,将标准的 sRGB 值作为 Color Matrix 的输出,将 Color Matrix 模块前图像的 RGB 灰度值作为 Color Matrix 的输入,然后由最小二乘法来拟合 Color Matrix 中的 12 个参数^[10]。由文献[7]可知,当拟合出来的 RGB 结果与标准图像的 RGB 值的偏差平方和(如式(4)所示)最小时的 Color Matrix,被认为是最逼近的 Color Matrix 结果。

$$\sum_{i=1}^m \delta_i^2 = \sum_{i=1}^m \left[\sum_{j=0}^n a_j x_i^j - y_i \right]^2 \quad (4)$$

在 L^*ab 空间中优化 Color Matrix 计算结果是指,根据前面计算出的 Color Matrix 结果,计算按照正常的 data path 校正后的结果在 L^*ab 空间上与标准值的偏差 ΔE ,然后将得到的偏差归一化后作为权重矩阵,并利用式(5)重新优化 Color Matrix。式(5)为加入权重后的求解 Color Matrix 的方法。式(5)中 M' 为标准值, M 为相机 Color Matrix 输入图像的 RGB 灰度值。之后再根据 Color Matrix 结果,再次对按照正常的 data path 校正后的结果在 L^*ab 空间上与标准值的偏差进行归一化,然后将结果作为权重矩阵,并利用式(4)重新优化 Color Matrix。如此不断迭代,直到图像各区域的颜色偏差 ΔE 基本在 (0, 10) 范围时得到 Color Matrix 的最优结果。

$$C = ((M * \omega * M^T)^{-1} * M * \omega * M^T)^T \quad (5)$$

RGB 与 L^*ab 的转换方法主要分为 3 步:

(1) 迭代逼近原理是用于 linear RGB 空间中的,因此需将 linear RGB 转化为标准的 XYZ 色度系统下的三颜色刺激值 XYZ,其转换公式如式(6)所示:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_R & X_G & X_B \\ Y_R & Y_G & Y_B \\ Z_R & Z_G & Z_B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} LinearR \\ LinearG \\ LinearB \end{bmatrix} \quad (6)$$

(2) 将 XYZ 转换为 xyz ,其转换公式如式(7)所示:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X/X_w \\ Y/Y_w \\ Z/Z_w \end{bmatrix} \quad (7)$$

(3) 将 xyz 数据转化到 L^*ab 空间,在此空间中,不同颜色区域的颜色均匀区间差别较小。其中, xyz 与 L^*ab 空间的转换公式如式(8)所示:

$$\begin{cases} L^* = 116(y)^{1/3} - 16, & y > 0.008856 \\ a = 500[(x)^{1/3} - (y)^{1/3}], & x > 0.008856 \\ b = 200[(y)^{1/3} - (z)^{1/3}], & z > 0.008856 \end{cases} \quad (8)$$

当 xyz 中至少有一个小于 0.008856 时,颜色的三刺激值 xyz 数据转换到 L^*ab 空间的公式如式(9)所示:

$$\begin{cases} L^* = 903.3y \\ a = 3893.5(x-y) \\ b = 1557.4(y-z) \end{cases} \quad (9)$$

此时,在 L^*ab 空间中,色差的公式如式(10)所示:

$$\Delta E_{ab} = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2]^{1/2} \quad (10)$$

其中, ΔE_{ab} 即为新的颜色矩阵计算算法中的颜色偏差 ΔE 。

2 结果及分析

2.1 设备和光源的选取

在普通环境下,选用色温为 6500k(相当于白天的平均光照)的标准白源 D65 作为照明光源,这样可将相机拍摄的 ColorCheck24 图像呈现出的颜色更接近于自然光下的真实颜色。选用颜色条(ColorBar)、灯箱和泰克 1720 矢量示波器等作为辅助设备,当 ISP 或者 TV Encoder 直接输出标准的 Color bar 时,矢量示波器(Vectorscope)将输出标准的图形,所有的点都在屏幕的小格子中,如图 3 所示;而当颜色出现偏差时,点的位置就会偏离示波器,如图 4 所示,因此它可用于验证颜色校正的准确性。

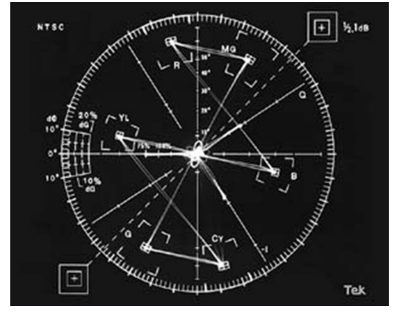


图 3 色条中所有的测试点都在正确放置在水平轴上

Fig. 3 All test points in color bar are correctly placed on horizontal axis

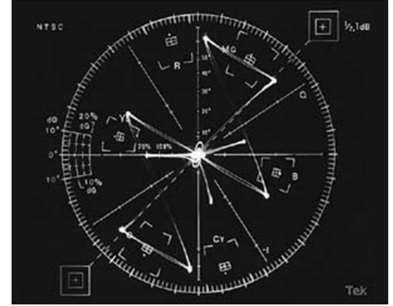


图 4 点的位置偏离示波器屏幕中的小格子

Fig. 4 Position of points deviates from small grid on oscilloscope screen

2.2 颜色校正的测试过程

对相机拍摄的 ColorCheck24 手工修改 R_{gain} 和 B_{gain} 之后,以 Color Bar 结合 Vector scope 来分析 Hue, Saturation, Brightness, Contrast 等参数对颜色校正结果的影响,目的是找出这些参数的最佳组合方式。

2.2.1 Hue

首先将标准的 75% Color Bar 作为原始数据直接输入 ISP,关闭 ISP 后续的所有模块,输出的结果为标准的 75% Color Bar,然后将输出的信号连接到 TV 和 Vector scope,最后通过修改 ISP 参数和改变 Hue 参数,来验证 Hue 带来的影响是图像的整体旋转。

2.2.2 Saturation

重新恢复 75% Color Bar 设置,然后将 Saturation 改变为原来大小的 1/2,从而验证出 Saturation 带来的影响是图像出现整体收缩。

2.2.3 Brightness 和 Contrast

在测试 Contrast 和 Brightness 对校正图像的影响时,发现无论改变 Contrast 和 Brightness 中的任何一个,在 Vectorscope 上得到的图像特征基本一致。最后的结果表明,虽然改变了图像的 RGB,但 Vectorscope 图像却未产生明显的影响。

由上面 3 个小节的分析可以看出,虽然 Hue, Saturation, Contrast, Brightness 等都对 RGB 的值有较大的影响,但是对 Vectorscope 的影响却是不同的。Hue, Saturation 能够明显改变 Vectorscope 图像的形状,但是 Contrast, Brightness 对 Vectorscope 图像的形状影响不大。按照上述测试, Hue, Saturation 等 4 个 Color Matrix 相关模块对校正图像的影响的方法,可获得 RGB 空间最逼近 Color Matrix 的一组最佳参数。

2.2.4 校正之前的 Vectorscope 图像

首先关闭 ISP 各项和 Color Correction 相关的模块,然后

将智能相机直接拍摄 Color Bar 灯箱, 最后发现所采集到的 Vectorscope 图像不仅在各色块色调上与标准的 75% Color Bar 的 Vectorscope 图像偏差很远, 且在幅度上也偏差很远。因此, 色彩校正的目标就是, 图像通过 ISP 各项参数的调整后, 达到类似标准图像的结果。

2.3 颜色校正的结果和分析

2.3.1 颜色校正的结果

将抓取 Color Matrix 模块前的 Color Check 24 图像和标准 ColorCheck24 的 sRGB 值作为 Color matrix 的输入和输出, 利用最小二乘法初步计算最逼近标准的颜色矩阵值, 再将其经过颜色校正后, 计算与标准值的偏差, 并通过不断迭代计算出最优的颜色矩阵结果。由于采集的 Color Matrix 模块前图像的 RGB 比较暗, 为便于更好地比较校正前后的结果, 对其加载 Gamma, 加载完后的图像如图 5 所示, 其中 Gamma 使用的是标准的 sRGB gamma 值。加载新算法在 L^*ab 空间优化的 Color matrix 后, 图像如图 6 所示。



图 5 不加 Color matrix 的图像

Fig. 5 Image without color matrix



图 6 在 L^*ab 空间加载新算法的图像

Fig. 6 Loading the image of new algorithm in L^*ab space

2.3.2 校正结果的分析

通过校正前、校正后各个色块的平均灰度值与标准值的比较, 来分析新的计算方法的颜色校正性能, 得到的 R, G, B 色通道的结果分别如图 7—图 9 所示。

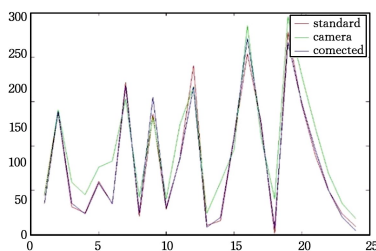


图 7 R 平面标准值、实际值和校正后值的对比(电子版为彩色)

Fig. 7 Comparison of R plane standard value, actual value and corrected value

图 7 中, 图像的横坐标为 1~24 色块的索引值, 红色线条为标准值, 蓝色线条分别代表加载 Color Matrix 校正后的 $R,$

G, B 值, 绿色线条分别为相机直接拍摄 Color Check 24 图像的 R, G, B 值。

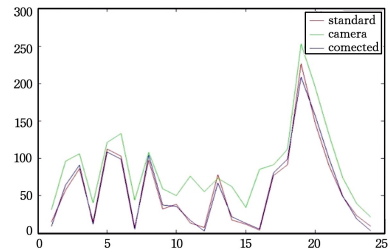


图 8 G 平面标准值、实际值和校正后值的对比(电子版为彩色)

Fig. 8 Comparison of G plane standard value, actual value and corrected value

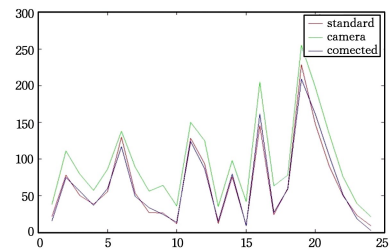


图 9 B 平面标准值、实际值和校正后值的对比(电子版为彩色)

Fig. 9 Comparison of B plane standard value, actual value and corrected value

由这三幅图可明显看出, 蓝色线条比绿色线条在大部分色块上更严格接近红色线条, 即使用新的颜色矩阵计算的颜色矩阵方法提高了色彩还原度。

2.3.3 与传统颜色矩阵计算方法的研究对比

图 10 表示的是在 L^*ab 空间 ΔE 的结果分析, 其公式如式(10)所示。图 10 中, 红色线条表示校准前的颜色偏差, 蓝色线条表示加载原来方法计算出的 Color Matrix 校正后的色差值, 绿色线条表示加载新方法计算出的 Color Matrix 校正后的色差值。

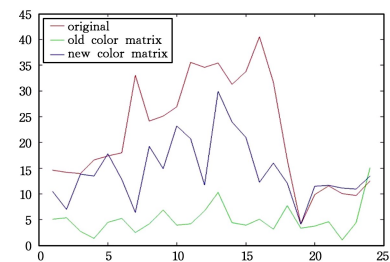


图 10 L^*ab difference 实际值、原来方法和新方法校准值的对比

Fig. 10 Comparison of the actual value of L^*ab difference, the calibration values by the original method and the new method

从图 10 中可看出, 校正后的蓝色线条和绿色线条表示的色差和校正前相比, 在很多色块上有明显程度的减小, 即新的颜色矩阵计算方法比传统的方法在很多色块上更能减少与标准图像颜色的偏差。

结束语 本文提出了一种首先在 RGB 空间求出最逼近的 Color Matrix, 然后在 L^*ab 空间中优化计算结果的改进方法, 用融合多颜色空间信息的方法来代替传统方法在 RGB 空间中以穷举的方式逼近目标值的方式。为验证算法的有效性, 以色温为 6500k 的标准白源 D65 为照明光源, Color

- [8] CHEN L C, ZHU Y, PAPANDEOU G, et al. Encoder-decoder with atrous separable convolution for semantic image segmentation[C]//Proceedings of the European Conference on Computer vision (ECCV). 2018;801-818.
- [9] ZHAO H S, SHI J P, QI X J, et al. Pyramid Scene Parsing Network[J]. arXiv:1612.01105v2, 2017.
- [10] ZHANG R, TANG S, ZHANG Y, et al. Scale-Adaptive Convolutions for Scene Parsing[C]//2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV). IEEE, 2017.
- [11] YU C, WANG J, PENG C, et al. BiSeNet: Bilateral Segmentation Network for Real-Time Semantic Segmentation[C]//Computer Vision—ECCV 2018. Lecture Notes in Computer Science, vol 11217.
- [12] PENG C, ZHANG X, YU G, et al. Large Kernel Matters—Improve Semantic Segmentation by Global Convolutional Network [C]//2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). IEEE, 2017.
- [13] SIMONYAN K, ZISSERMAN A. Very Deep Convolutional Networks for Large-Scale Image Recognition[J]. Computer Science, 2014.
- [14] SZEGEDY C, LIU W, JIA Y, et al. Going Deeper with Convolutions[C]//2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Boston, MA, 2015;1-9.
- [15] CHEN L C, PAPANDEOU G, KOKKINOS I, et al. Semantic Image Segmentation with Deep Convolutional Nets and Fully Connected CRFs[J]. Computer Science, 2014(4):357-361.
- [16] HU J, SHEN L, ALBANIE S, et al. Squeeze-and-Excitation Networks[J]. arXiv:1709.01507v4, 2019.
- [17] CORDTS M, OMRAN M, RAMOS S, et al. The Cityscapes Dataset for Semantic Urban Scene Understanding[J]. arXiv:1604.01685, 2016.
- [18] BROSTOW G J, SHOTTON J, FAUQUEUR J, et al. Segmentation and Recognition Using Structure from Motion Point Clouds [C]//European Conference on Computer Vision. Springer, Berlin, Heidelberg, 2008.
- [19] HE K, ZHANG X, REN S, et al. Deep Residual Learning for Image Recognition[J]. arXiv:1512.03385, 2015.



REN Tian-ci, born in 1995, postgraduate. His main research interests include computer vision and pattern recognition.



DING Wei-li, born in 1979, Ph.D, professor, Ph.D supervisor, is a member of China Computer Federation. Her main research interests include computer vision, pattern recognition and human-computer interaction.

(上接第 160 页)

Check24 色卡/ColorCheck+ Vectorscope 为仿真对象,结果表明,本文方法取得了很好的色彩校正效果,降低了色彩偏差。然而,由于本文使用的 Gamma 曲线对黑色部分调整过大,使得 ColorCheck24 中易受噪声影响的色块的噪声被进一步放大,造成了部分色块上的 RGB 偏差较大,因此,如何修改 Gamma 曲线,使整个图像的色彩获得更好的表现效果,是下一步的研究方向。

参 考 文 献

- [1] CARROLL J. Smart cameras evolve to meet expanding machine vision needs[J]. Vision Systems Design, 2019, 24(8).
- [2] GUO Y, GAO K, ZHU J, et al. A color cam correction method based on LASSO regression model [J]. Imaging Science and Photochemistry, 2017, 35(2):153-161.
- [3] LEVENSON R, BRACKEN C, SHARMA C, et al. Calibration between trigger and color: Neutralization of a genetically encoded coulombic switch and dynamic arrest precisely tune reflection assembly[J]. The Journal of biological chemistry, 2019, 294(45).
- [4] ZHOU Z M. Spatial consistency correction and yarn color measurement of multispectral imaging system [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [5] GONG R. Evaluation method and Application Research on image display performance of intelligent mobile terminal [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [6] LU Z G, HE P, ZHI L J, et al. Study on trigonometric model fitting based on least square polynomial [J]. Applied Optics, 2019, 40(5):853-858.
- [7] FANG J, ZHANG Y, CUI W, et al. Outdoor light estimation algorithm based on white balance correction [J]. Computer Science, 2019, 46 (a):211-214.
- [8] BA T, GUANG D, ROBERT R. A fast white balance algorithm based on pixel greyness[J]. Signal, Image and Video Processing, 2017, 11(3).
- [9] WANG F, WANG W. A fast automatic white balance algorithm with dark channel priority [J]. Optoelectronic Engineering, 2018, 45 (1):7.
- [10] WU Q Q, SONG X N. A face anti-fraud method based on multi-channel feature and least square decision[J]. Computer Application research, 2019, 163.



TANG Jia-lin, born in 1982, Ph.D, lecturer. His main research interests include artificial intelligence and so on .



GUO Yan-feng, born in 1978, Ph.D. His main research interests include artificial intelligence and so on.