

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2016.01.012

基于胞元搜索的显示器颜色特征化模型

聂 鹏¹, 孔玲君^{1,2}

(1. 上海理工大学 出版印刷与艺术设计学院, 上海 200093;
2. 上海出版印刷高等专科学校 印刷包装工程系, 上海 200093)

摘 要: 为提高显示器颜色转换模型的精度, 提出了一种基于胞元搜索的四面体插值特征化模型。该模型首先对查找表数据进行胞元划分, 通过胞元搜索的方法, 找到目标颜色所属的立方体子空间, 然后运用四面体反向插值, 实现颜色从 CIE Lab 空间到 RGB 空间的转换。检测样本的试验数据表明: 所提模型的预测精度较高, 平均色差达到 0.95 CIE Lab 色差单位, 94% 的样本色差值小于 3 CIE Lab 色差单位。新模型的数据结果优于已有文献算法的, 因而, 所提颜色特征化模型可实现显示器颜色空间的准确转换。

关键词: 胞元搜索算法; 反向四面体插值; 查找表; 显示器特征化

中图分类号: TP391.41; TN911.73 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-7100(2016)01-0063-05

A Monitor Colorimetric Characterization Model Based on Cell-Search Method

NIE Peng¹, KONG Lingjun^{1,2}

(1. College of Communication and Art Design, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. Department of Printing and Packaging Engineering, Shanghai Publishing and Printing College, Shanghai 200093, China)

Abstract : A colorimetric characterization model based on cell-search method with tetrahedral interpolation was proposed to improve the precision of the color conversion model for monitors. The lookup table data was divided into cells to find the cube space of the target color by cell-search method, and the color space conversion from CIE Lab space to RGB space was realized by using the tetrahedral inverse interpolation. The experimental data of the tested color samples showed that the proposed model had high precision accuracy with the mean color difference of 0.95 CIE Lab, and color differences of 94% color samples were less than 3 CIE Lab units. The result of data in new model was superior to the existing literature algorithm results and the proposed colorimetric characterization model could realize the accurate conversion of monitor's color spaces.

Key words: cell-search method; tetrahedral inverse interpolation; look-up table; monitor colorimetric characterization

0 引言

显示器是常用且重要的显色设备, 而显示器特征化是保证颜色在显示设备上准确再现的重要步骤。显示器特征化包括正向转换和反向转换两部分。正向转换是指由显示器的 RGB 空间到 CIE Lab 等与设备

有关的颜色空间的转换, 其主要的研究方法有 GOG 模型^[1-2]、三维查表法^[3-5]、人工神经网络法^[6-7]、多项式回归模型^[8-10]等, 其中的三维查表法是最常用的方法。反向转换是指由 CIE Lab 等标准色空间到显示器 RGB 空间的转换, 该转换过程较复杂, 仍是目前

收稿日期: 2015-10-06

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(61301231)

作者简介: 聂 鹏(1991-), 男, 湖北黄冈人, 上海理工大学硕士生, 主要研究方向为色彩管理, E-mail: 951415464@qq.com

显示器特征化方面研究的重点。如徐海松等人^[11]提出了基于立方体细分的查找表插值匹配算法,该算法需要进行多次迭代和插值,计算量较大,颜色转换的效率较低;刘浩学等人^[12]利用显示器显示色与三原色光谱辐亮度函数之间存在线性叠加关系的特性,提出了一种根据数字驱动值和对应的三原色光谱辐亮度函数计算任意显示色的算法,该算法的计算准确性较高,但需要测量并存储大量样本的高维光谱信息,计算量很大;张桢杰等人^[13]结合光谱组介堡方程,提出了一种高效的胞元搜索方法,以实现颜色空间的转换,但由于光谱组介堡方程的解法过程较复杂,模型的颜色效率较低。

本研究在参考已有文献的基础上,结合四面体插值匹配算法,提出一种基于胞元搜索的四面体特征化模型,实现了显示器设备颜色从CIE Lab到RGB的色空间转换,以期为实现高效的显示器反向转换提供一定的理论参考。

1 模型的建构

由于RGB色空间是规则均匀的空间,从RGB到Lab的正向转换是一个线性转换过程,相对较容易。例如,在三维查找表中,对于目标点的RGB值,根据三维查找表中节点处的R、G、B值,可以判断其在RGB空间中所处的立方体空间;结合立方体空间顶点处的查找表数据,通过简单地线性插值可以得到目标点的Lab值。而Lab空间是非规则色空间,从Lab到RGB的直接线性转换,精度不高,且难度较大。本研究结合高精度的反向四面体插值方法,提出一种基于胞元搜索的四面体特征化模型。该模型通过搜索胞元的方法,确定目标颜色所处的胞元空间,然后通过对胞元进行反向四面体插值实现颜色空间转换,并对超出色差阈值的颜色点进行优化补偿,以提高颜色转换的精度。基于胞元搜索的四面体特征化模型的算法流程如图1所示。

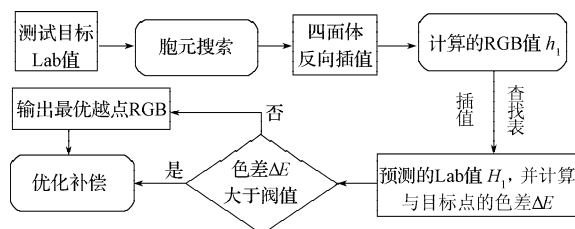


图1 基于胞元搜索的四面体特征化模型流程

Fig. 1 Flow chart of characterization model based on cell-search method with tetrahedral interpolation

1.1 三维查找表

颜色空间转换以查找表的数据为基础,因此创

建查找表是颜色空间转换的一个重要前提。在对目标颜色点进行胞元搜索前,需要创建三维查找表。

将R、G、B数值0~255进行 n 等分,组合为 n^3 对RGB数值;然后以此数值对为依据,制作样本集色块;通过显示器依次显示这些样本色块,并用测色计测量其CIE Lab色度值,构成采样的 n^3 组实验数据,形成一张样本集的RGB-Lab查找表。

1.2 胞元搜索算法

创建三维查找表后,通过胞元搜索算法,可确定目标颜色所处的胞元子立方体空间,从而快速运用反向插值,准确计算出目标颜色的RGB数值。胞元搜索的具体算法流程如下:

1) 对RGB颜色空间划分胞元,将查找表数据存放在 $n \times n \times n$ 个胞元立方体中。

2) 计算胞元假想中心点的数据,其中,胞元中心点的Lab值取立方体顶点数据的平均值,具体的计算公式如下:

$$P_n(L, a, b) = \frac{1}{8} \sum_{i=0}^7 P_i(L_i, a_i, b_i). \quad (1)$$

3) 计算目标点与胞元假想中心点的色差,选取假想中心点与目标颜色差异值最小的前 t 个胞元作为目标点所处的预选立方体集。根据实验训练得知,当 t 值为9时,模型的转换精度达到目标要求,且模型的转换速率较低。因此,为了计算准确,本研究中设置 t 值为9。

4) 在预选出的立方体集中,通过反向四面体插值方法得到每个胞元对应的RGB解,然后通过查找表正向四面体插值方法,计算每组解出的RGB值所对应的Lab值,比较插值计算的Lab值与目标点的色差,选取色差最小的胞元作为目标点所在的立方体空间,并且以对应的RGB解作为目标颜色点的RGB输出值。

1.3 反向四面体插值算法

在确定目标颜色所处的胞元子立方体空间后,运用反向四面体插值实现颜色从Lab到RGB空间的转换^[4]。反向四面体插值只需测量并存储源RGB立方体空间的8个顶点数据和目标点的Lab数值,就可以快速地插值计算目标点的RGB值。具体的算法构建原理如下:

1) 在立方体空间中,记录立方体8个顶点的Lab值和RGB数据,并将立方体切分成5个四面体(如图2所示),以备下一步处理。

2) 在立方体空间的5个四面体中,按照式(2)对目标点的Lab值进行归一化处理,得到目标点在四面体Lab空间中的坐标位置 (α, β, γ) ,然后根据表

1的关系式,判断目标点所处的四面体。

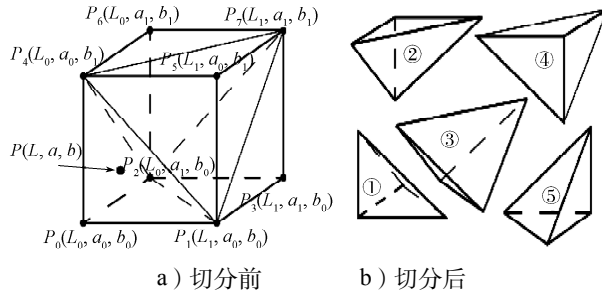


图2 对立方体空间进行四面体切分

Fig. 2 Cube space divided into five tetrahedron spaces

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{A_1} - L_{A_0} & L_{A_2} - L_{A_0} & L_{A_3} - L_{A_0} \\ a_{A_1} - a_{A_0} & a_{A_2} - a_{A_0} & a_{A_3} - a_{A_0} \\ b_{A_1} - b_{A_0} & b_{A_2} - b_{A_0} & b_{A_3} - b_{A_0} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} L_P - L_{A_0} \\ a_P - a_{A_0} \\ b_P - b_{A_0} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} R_P \\ G_P \\ B_P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 - R_0 & R_2 - R_0 & R_3 - R_0 & L_1 - L_0 & L_2 - L_0 & L_3 - L_0 \\ G_1 - G_0 & G_2 - G_0 & G_3 - G_0 & a_1 - a_0 & a_2 - a_0 & a_3 - a_0 \\ B_1 - B_0 & B_2 - B_0 & B_3 - B_0 & b_1 - b_0 & b_2 - b_0 & b_3 - b_0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} L_P - L_0 \\ a_P - a_0 \\ b_P - b_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_0 \\ G_0 \\ B_0 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

式(3)中, (R_i, G_i, B_i) , (L_i, a_i, b_i) , i 取0~3, 分别表示四面体的4个顶点的RGB和Lab值。

1.4 优化补偿

Lab空间是非规则色空间,根据三维查找表直接计算目标点的RGB值,可能会出现色差大于5的情况,超出影响模型转换的精度。为了提高颜色空间转换的精度,根据人眼对颜色差别的视觉感知程度^[14],本文将图1中模型的色差阈值设置为5,选择对超出该色差阈值的颜色点进行优化补偿。优化补偿的具体流程如下:

1) 计算训练样本和目标点之间的色度差异,记为 $\Delta E_i (i=1, 2, \dots, n)$,其中, n 为训练样本数。

2) 按色差升序,对训练样本的颜色Lab值排序,排序结果记为 $Lab_i (i=1, 2, \dots, n)$ 。

3) 选取 $Lab_i (i=1, 2, \dots, n)$ 的前 j 个数据(j 的初始值设为2,因为框定一个胞元至少需要2组样本的Lab和RGB值),得 $Lab_i (i=1, 2, \dots, j)$ 。

4) 判断样本 Lab_i 颜色点在色空间上能否框定一个胞元,若能框定一个胞元,则该胞元即是目标颜色所处的胞元立方体空间;若不能框定一个胞元, j 自增1,重复执行步骤3)~4)。

判断能否框定胞元的方法为:查找训练样本集,找出与 $Lab_i (i=1, 2, \dots, j)$ 对应的 $RGB_i (i=1, 2, \dots, j)$,并求 RGB_i 在R, G, B 3个通道的最大值 $R_{\max}, G_{\max}, B_{\max}$ 和最小值 $R_{\min}, G_{\min}, B_{\min}$ 。若 $(R_{\max} - R_{\min}) \times (G_{\max} - G_{\min}) \times (B_{\max} - B_{\min}) = 0$,则不能框定胞元;反之,则能框定胞

式(2)中, $(L_{A_0}, a_{A_0}, b_{A_0})$, $(L_{A_1}, a_{A_1}, b_{A_1})$, $(L_{A_2}, a_{A_2}, b_{A_2})$, $(L_{A_3}, a_{A_3}, b_{A_3})$, (L_P, a_P, b_P) 分别为四面体空间4个顶点 A_0, A_1, A_2, A_3 和目标颜色点 P 的Lab值。

表1 判断定位插值点的四面体空间

Table 1 Tetrahedron space for locating interpolation point

四面体	满足关系式	包含顶点
T_1	$\alpha + \beta + \gamma \leq 1$	P_1, P_2, P_3, P_6
T_2	$\alpha + \beta + \gamma \leq 1$	P_0, P_1, P_3, P_4
T_3	$\alpha + \beta + \gamma \leq 1$	P_3, P_4, P_6, P_7
T_4	$\alpha + \beta + \gamma \leq 1$	P_1, P_4, P_5, P_6
T_5	$\alpha + \beta + \gamma \leq 1$	P_1, P_3, P_4, P_6

3) 结合判断出的四面体的4个顶点的数据,按式(3)对目标点 P 进行三维线性插值,得到目标点的RGB值。

元。并利用这6组值的重新组合来确定胞元立方体的8个顶点 (R_k, G_k, B_m) , k, l, m 为max或min。

5) 根据该胞元立方体的8个顶点的RGB值,搜索查找表,得到该胞元8个顶点的Lab值,并通过反四面体插值方法,得到目标点的最优RGB值。

2 试验与结果分析

为了验证所提模型的有效性,对所提模型进行建模试验,测定其颜色转换精度和转换效率。文献[13]提出了一种基于立方体细分的查表插值匹配算法模型实现CIEXYZ到设备RGB颜色空间的反向变换,其实验结果证明其颜色控制精度优于较多已有相关文献结果,故选用该立方体细分的插值匹配算法模型的试验结果与本研究结果进行对比。

2.1 试验模型的建立

试验选取24英寸的NEC PA302W型号显示器为研究对象,显示分辨率设置为1 920像素×1 200像素,以X-rite eye-one为测量设备,测试环境为暗室环境。对显示器R, G, B通道的0~255响应值进行10等分采集,组合为 $11^3=1\ 331$ 对RGB数值,使用MATLAB软件制作色块,色块大小为5 cm×5 cm,并在显示器上显示,通过Eye-one测量这些色块,得到训练样本集的Lab值。

采用基于胞元搜索四面体特征化模型,结合训练样本颜色的Lab测量值和RGB响应值,建立显示器的颜色转换模型。

同时,采用文献[13]提出的立方体细分的插值匹配算法模型,结合训练样本颜色的Lab测量值和RGB响应值,建立显示器的颜色转换模型。

2.2 模型的精度分析

检测样本的采集方法与训练样本相似,对显示器R, G, B通道响应值进行6等分采集,由此基于NEC显示器共采集 $7^3=343$ 个颜色样本,并测量其Lab值,用于检验模型颜色转换的精度。对343个检测样本的颜色数据,首先由胞元搜索判断其所处的胞元子空间,运用反向四面体插值方法,计算检测样本颜色的R, G, B响应值。然后,通过查找表方式计算样本颜色的Lab值。最后,分析样本颜色Lab值的计算值和测量值色差,如果色差大于阈值6,则对该样本颜色进行优化补偿操作,重新框选胞元立方体空间,并进行四面体反向插值;反之,将符合条件的颜色响应值认定为最终输出值。

对343个检测颜色样本的最终输出值进行显示,并通过Eye-one测量获得样本颜色的预测Lab值,计算343个检测样本的颜色测量值和基于胞元搜索的反向四面体模型预测值的色差。图3给出了343个检测颜色样本采用基于胞元搜索的四面体模型和立方体细分的查表插值匹配算法模型^[13]转换后得到的色差累计相对频率。

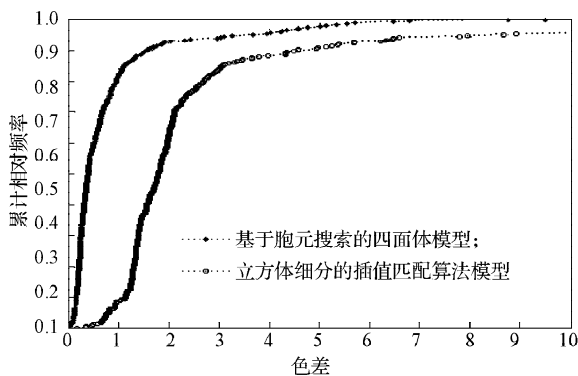


图3 检验样本的色差累计相对频率

Fig. 3 The cumulative relative frequency of color difference of test samples

从图3中可以看出,基于胞元搜索的四面体模型中,预测颜色的色差小于3.0的检验色块占94%,而基于立方体细分的查表插值匹配算法模型中,预测颜色的色差小于3.0的检验色块为85%。这一结果说明,相比立方体细分的查表插值匹配算法的颜色转换模型,本文提出的模型能更好地实现目标颜色点从Lab空间到RGB空间的转换。

表2为两种不同的颜色特征化模型对343个检验样本最大色差和平均色差的比较,其中模型的训练样本数都是1331。

表2 不同特征化模型的检验样本色差

Table 2 The color differences of test samples with different characterization models

算 法	最大色差	平均色差
立方体细分的查表插值匹配算法模型	13.72	2.49
基于胞元搜索的四面体模型	9.48	0.95

由表2可知,采用本文提出的基于胞元搜索的四面体模型后,样本颜色的平均色差为0.95,比立方体细分的插值匹配算法模型的低,说明本文提出的模型颜色转换精度较高。在模型的稳定性方面,基于胞元搜索的四面体模型的最大色差为9.48,小于立方体细分的插值匹配算法模型的最大色差,说明该模型的稳定性较好。

2.3 模型的转换运行效率分析

图4给出了基于胞元搜索的四面体模型和基于立方体细分的插值匹配算法模型对给出的343个检测颜色样本的颜色转换运行效率比较结果。

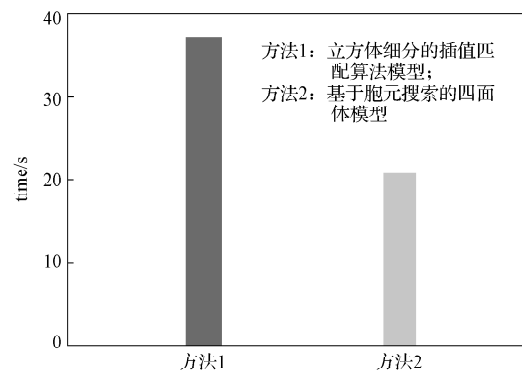


图4 特征化模型的运算效率比较

Fig. 4 Comparison of operation efficiency with different characterization model

由图4可知,采用提出的基于胞元搜索的四面体模型对343个检测样本进行处理,只需要21s左右就能完成颜色从CIE Lab空间到RGB空间的转换,而采用立方体细分插值匹配算法模型完成343个检测样本的颜色转换约需要38s。相较而言,基于胞元搜索的特征化模型运算效率提高了近1倍,由此说明,基于胞元搜索的四面体模型能够有效提高显示器特征化的颜色转换效率。

3 结论

本文结合胞元搜索和四面体反向插值的方法,提出一种基于胞元搜索的四面体特征化模型。并且对343个颜色色块进行了测试,与已有文献方法的对比结果表明:

1) 相比于立方体细分的查表插值匹配算法模

型,所提基于胞元搜索的四面体模型,其预测值与测量值的色差平均值在1.0以下,模型的运算效率提高了近1倍;基于胞元搜索的四面体特征化模型的转换精度和效率更高。

2)所提模型能对颜色预测色差大于6的色块进行优化补偿,使94%的色块色差值在3.0以下。

以上结果说明,基于胞元搜索的四面体特征化模型的预测精度优良,该模型可以确定目标颜色所处的胞元子空间,同时对超出色差阈值的颜色点进行优化补偿,能快速准确地实现显示器从CIE Lab色空间到RGB色空间的转换。

参考文献:

- [1] CHO Yangho, IM Hyeobong, HA Yeongho. Inverse Characterization Method of Alternate Gain-Offset-Gamma Model for Accurate Color Reproduction in Display Device[J]. Journal of Imaging Science and Technology, 2006, 50(2): 139-148.
- [2] 何 华, 黄 慧, 孙娅妮. GOG模型在LCD特性化中的适用性研究[J]. 昆明学院学报, 2009, 31(3): 99-101.
HE Hua, HUANG Hui, SUN Yani. Study on Applicability of GOG Model for LCD Characterizing[J]. Journal of Kunming University, 2009, 31(3): 99-101.
- [3] BEHNAM Bastani, BILL Cressman, BRIAN Funt. Calibrated Color Mapping Between LCD and CRT Displays: A Case Study[J]. Color Research and Application, 2005, 30(6): 438-447.
- [4] 许宝卉. 基于三维查找表插值算法的显示器色彩空间转换模型的研究[J]. 包装工程, 2011, 32(5): 77-79.
XU Baohui. Research on Display Color Space Conversion Model Based on Three-Dimensional Lookup Table Interpolation Algorithm[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(5): 77-79.
- [5] 刘一方, 张云峰, 迟 静, 等. 基于SSLUT的颜色空间转换的快速算法[J]. 山东大学学报(工学版), 2013, 43(1): 41-47.
LIU Yifang, ZHANG Yunfeng, CHI Jing, et al. A Fast Algorithm for Color Space Transformation Based on SSLUT[J]. Journal of Shandong University(Engineering Science), 2013, 43(1): 41-47.
- [6] 何颂华, 张 刚, 陈 桥, 等. 基于BP神经网络的多基色打印机光谱特性化[J]. 包装工程, 2014, 35(13): 110-115.
HE Songhua, ZHANG Gang, CHEN Qiao, et al. Spectral Characterization of Multicolor Printer Based on BP Neural Network[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(13): 110-115.
- [7] 洪 亮, 楚高利, 邓 倩, 等. 广义回归神经网络在显示器颜色空间转换中的应用[J]. 包装工程, 2015, 36(15): 145-148.
HONG Liang, CHU Gaoli, DENG Qian, et al. Application of General Regression Neural Network in the Display of Color Space Conversion[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(15): 145-148.
- [8] GONG Rui, XU Haisong, ZHANG Xiandou, et al. Sub-Space Compensation Model for Accurate Colorimetric Characterization of Liquid Crystal Displays[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(4). DOI: 10.3788/AOS201131.0433001.
- [9] 丁柏秀. 基于多项式回归逼近的LED显示色域变换技术研究[D]. 吉林: 中国科学院大学, 2013.
DING Baixiu. Research on LED Color Gamut Transformation Based on Polynomial Regression and Approximation[D]. Jilin: University of Chinese Academy of Sciences, 2013.
- [10] 霍 星, 解 凯. 基于多项式回归模型的液晶显示器特性化[J]. 北京印刷学院学报, 2014, 22(6): 25-28.
HUO Xing, XIE Kai. Colorimetric Characterization for LCD Based on Polynomial Regression Model[J]. Journal of Beijing Institute of Graphic Communication, 2014, 22(6): 25-28.
- [11] 徐海松, 张显斗. 数字图像设备颜色特征化反向变换算法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2008, 42(12): 2199-2201, 2232.
XU Haisong, ZHANG Xiandou. Inverse Conversion Algorithm of Colorimetric Characterization for Digital Imaging Devices[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2008, 42(12): 2199-2201, 2232.
- [12] 刘浩学, 郑 岚, 代 黎, 等. 基于光谱叠加特性的液晶显示器颜色特征化方法研究[J]. 光学学报, 2011, 31(12): 1233002-1-1233002-5.
LIU Haoxue, ZHENG Lan, Dai Li, et al. Color Characterization of LCD Based on Spectral Additive Properties[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(12): 1233002-1-1233002-5.
- [13] 张桢杰, 刘 真, 吴明光, 等. 一种高效的胞元光谱组介堡模型胞元搜索算法[J]. 包装工程, 2013, 34(15): 19-22, 74.
ZHANG Zhenjie, LIU Zhen, WU Mingguang, et al. High-Efficient Cell-Search Method for Cellular Yule-Nielsen Spectral Neugebauer Model[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(15): 19-22, 74.
- [14] MOU T, SHEN H L. Colorimetric Characterization of Imaging Device by Total Color Difference Minimization[J]. Journal of Zhejiang University Science A, 2006, 7(6): 1041-1045.

(责任编辑: 廖友媛)