

基于 OSA-UCS 数据的 CIECAM02 图像复制色差评价

杨文兵¹, 万晓霞², 邹文华³

(1. 义乌工商职业技术学院, 义乌 322000; 2. 武汉大学, 武汉 430079;

3. 浙江影天印业有限公司, 杭州 310000)

摘要: **目的** 为了改进彩色图像复制时在不同观测环境下的误差, 将优化后的色貌模型引入色彩信息转换。**方法** 在分析 CIECAM02-Jab 用于彩色图像复制的色彩评价的基础上, 提出利用 OSA-UCS 数据集建立新的优化色貌空间实验方案。利用线性回归的方法, 调整原始颜色空间中的明度和彩度, 构建出新的均匀颜色空间 $J_x a_x b_x$ 。**结果** 经过检验发现新的优化色貌空间 $J_x a_x b_x$ 色差的离散程度减轻, 空间更趋均匀, 更加符合均匀性标准。**结论** 新的优化色貌空间 $J_x a_x b_x$ 修正了均匀颜色空间的均匀性, 比 CAM02 初始色貌空间有了一定程度的提高, 对彩色图像复制的色差评价取得了一定的效果。

关键词: 彩色图像; 色差; 色貌空间; OSA-UCS 颜色系统

中图分类号: TS801.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)09-0225-05

Color Difference Evaluation on Image Reproduction of CIECAM02 Based on OSA-UCS Data

YANG Wen-bing¹, WAN Xiao-xia², ZOU Wen-hua³

(1. Yiwu Industrial and Commercial College, Yiwu 322000, China; 2. Wuhan University, Wuhan 430079, China;

3. Imgs Printing Co., Ltd., Hangzhou 310000, China)

ABSTRACT: The work aims to improve the error of color image reproduction under different observation conditions and introduce the optimized color appearance model into the color information conversion. On the basis of analyzing the color evaluation on CIECAM02-Jab used for color image reproduction, a new experimental scheme of optimizing the color appearance space was proposed with the OSA-UCS data set. By using the method of linear regression, the lightness and chroma coordinate scale in the original color space was adjusted, and a new uniform color space $J_x a_x b_x$ was constructed. After the inspection, it was found that the dispersion degree of color difference in the new optimized color appearance space $J_x a_x b_x$ was reduced, and the space tended to be more uniform and more in line with the uniformity standard. The new optimized color appearance space $J_x a_x b_x$ has modified the uniformity of the uniform color space and made some improvement compared to the CAM02 initial color appearance space. The color difference evaluation of color image reproduction has achieved certain results.

KEY WORDS: color image; color difference; color appearance space; OSA-UCS color system

在彩色图像复制时, 最终要求忠实再现原稿的颜色^[1], 由于媒体、设备、材料等因素影响, 因此必然存在一定的色误差, 这种差异大小应该反映了人的颜色视觉的判断^[2]。最新提出的 CIECAM02 色貌模型来进行色差评价将会成为今后发展的趋势^[3], 但是在使

用的过程中发现 CIECAM02 并不是一个理想的均匀颜色空间。目前对颜色空间视觉均匀性评价常用的实验数据有 2 种: 一种是小色差数据^[4], 一种是孟塞尔新标数据^[5]。不同点在于二者的评价的范围, 小色差数据主要是评价颜色空间局部的空间视觉均匀性, 而

收稿日期: 2016-10-15

基金项目: 国家自然科学基金(61275172); 国家重点基础研究发展计划(973) (2012CB725302); 高等学校访问工程师校企合作项目(FG2016129)

作者简介: 杨文兵(1977—), 男, 硕士, 义乌工商职业技术学院讲师, 主要研究方向为颜色科学与技术、数字印前技术。

孟塞尔新标数据则主要评价颜色空间整体的视觉均匀性。

国内外利用目前视觉上最均匀的美国光学学会均匀颜色标尺系统(OA—UCS)对CIECAM02色貌空间进行均匀性的评价和优化的尚处于探索阶段。为了更好地解决颜色再现效果的评价问题^[6],文中尝试用(OA—UCS)来优化CIECAM02色貌空间的均匀性并对优化后的貌空间进行检验^[7],进而希望CIECAM02的色貌空间更加均匀,更加符合色彩复制的要求。

1 实验数据集 OA—UCS

美国光学学会均匀颜色标尺系统(OA—UCS)是依据视觉等间隔的特性,使用几何学的方法建立起来的正棱面体晶格点阵模型^[8]。文中是在OA—UCS均匀颜色标尺系统中,把这个坐标系统划分成空间中的8个象限,在8个象限的每个象限中均匀地选取5个中心颜色样本做为将要选取的5个晶格的中心点。根据OA—UCS颜色空间晶格排列的特征,再选取与中心颜色样本有相等视觉差异的相邻的12个周围颜色样本,这样,12个周围颜色样本与中心颜色样本组成了13个颜色样本的数据组。每个象限5组数据,共40组数据。选取5个象限的不同明度中性灰颜色样本对。第1象限的5个中心颜色样本坐标分别为(0, 0, 0), (1, 1, 1), (2, 2, 4), (2, 4, 4), (3, 1, 3);第2象限坐标分别为(1, -1, 1), (1, -3, 1), (2, -2, 2), (3, -1, 1), (4, -2, 2);第3象限为(1, -1, -1), (2, -2, -2), (2, -2, -4), (3, -1, -3), (4, -2, -2);第3象限为(1, -1, -1), (2, -2, -2), (2, -2, -4), (3, -1, -3), (4, -2, -2);第4象限坐标分别为(0, 2, -4), (1, 1, -3), (2, 4, -4), (3, 3, -3), (4, 6, -2);第5象限坐标分别为(-1, 1, 1), (-2, 2, 2), (-2, 4, 4), (-3, 1, 1), (-4, 2, 2);第6象限坐标分别为(-1, -1, 1), (-2, -2, 2), (-2, -4, 4), (-3, -1, 1), (-4, -2, 2);第7象限坐标分别为(-1, -1, -1), (-2, -2, -2), (-3, -1, -1), (-4, -2, -2), (-5, -1, -1);第8象限坐标分别为(-1, 1, -1), (-2, 4, -4), (-3, 3, -1), (-3, 1, -1), (-5, 1, -1)。

2 CIECAM02 色貌空间均匀性的优化

均匀颜色空间一个重要的特征是颜色空间中2个颜色点的空间距离与人眼感觉出的颜色差别相一致^[9],基于这样的原则,利用线性回归的方法,调整原始颜色空间中的明度和彩度,构建出新的均匀颜色空间 $J_x a_x b_x$ 。

2.1 明度 J 的均匀性线性优化方法

选择CIECAM02中明度 J 、色度坐标 a, b 构建初始的颜色空间 $Jab^{[10]}$,其中 $a=C\cos h$, $b=C\sin h$ 。式

中: C, h 分别为CIECAM02中的彩度和色相角。选取5个象限的不同明度中性灰颜色样本对。第1象限的样本颜色对的坐标分别为(-6, 0, 0), (-4, 0, 0);第2象限的样本颜色对的坐标分别为(-4, 0, 0), (-2, 0, 0);第3象限的样本颜色对的坐标分别为(-2, 0, 0), (0, 0, 0);第4象限的样本颜色对的坐标分别为(0, 0, 0), (2, 0, 0);第5象限的样本颜色对的坐标分别为(2, 0, 0), (4, 0, 0)。

通过获取只有明度 L 变化的颜色样本数据,把这些颜色样本的 Y_{xy} 值根据公式转换成 XYZ 值^[11],转换到CAM02色貌空间中的颜色属性值,就变成了几乎只有 J 值变化的样本。转换公式为:

$$\begin{cases} X = \frac{x}{y} Y \\ Y = Y \\ Z = \frac{z}{y} Y = \frac{1-x-y}{y} Y \end{cases} \quad (1)$$

然后根据这些只有明度变化的样本颜色对数据建立 $\Delta J/\Delta V$ 和 J 的关系,利用一元线性回归的方法建立关系式:

$$\Delta J/\Delta V = K \times J + b \quad (2)$$

式中: ΔJ 为所选颜色样本在初始颜色空间 Jab 中的明度差; ΔV 为所选颜色样本对的视觉评估值,因为在OA—UCS均匀颜色标尺系统中,相邻颜色样本的颜色视觉差异被实验证明了是相同的^[12],文中所有颜色对的选择又都是基于相邻颜色样本^[13],因此 ΔV 可以归一化为1。之后新建的颜色空间的明度应该根据该回归方程做相应的调整,使明度在视觉上更加均匀,也就是说新色貌空间中的明度 J_x 增量不会随着明度 L 的变化而变化。

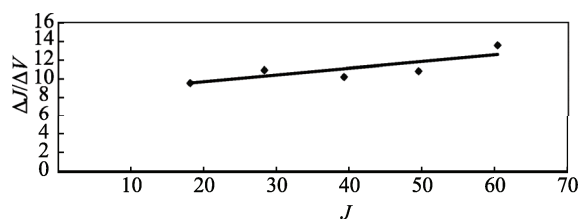


图1 $\Delta J/\Delta V$ 与 J 的关系散点

Fig.1 Relational scatter between $\Delta J/\Delta V$ and J

$\Delta J/\Delta V$ 与 J 的关系散点图见图。对这些散点进行线性回归得到:

$$\Delta J/\Delta V = 0.0724J + 8.077 \quad (3)$$

假设待建立的新明度标尺为 J_x ,则希望有 $\Delta J_x/\Delta V = (\Delta J_x/\Delta J) \times (\Delta J/\Delta V)$ 为常量 k 即:

$$\frac{\Delta J_x}{\Delta J} = k \frac{\Delta J}{\Delta V} \quad (4)$$

将式(3)代入式(4),并以微分形式表示,则有:

$$dJ_x = kd[J/(0.0724J + 8.077)] \quad (5)$$

通过积分推导得到新的明度 J_x :

$$J_x = \int_0^J dt / (0.0724t + 8.077)$$
$$= k \frac{\ln(0.0724J + 8.077) - \ln 8.077}{0.0724}$$

(6)

2.2 对明度 J 均匀性优化检验

将实验选用的 4 个不同色相的不同明度的颜色样本数据，不同明度中性灰的颜色样本坐标为(-6, 0, 0), (-4, 0, 0), (-2, 0, 0), (0, 0, 0), (2, 0, 0), (4, 0, 0)；不同明度偏黄的颜色样本坐标为(-6, 2, 0), (-4, 2, 0), (-2, 2, 0), (-1, 2, 0), (0, 2, 0), (1, 2, 0), (2, 2, 0), (4, 2, 0)；不同明度偏红的颜色样本坐标为(-6, 0, -2), (-4, 0, -2), (-2, 0, -2), (-1, 0, -2), (0, 0, -2), (1, 0, -2), (2, 0, -2), (4, 0, -2)；不同明度黄绿的颜色样本坐标为(-7, 1, 1), (-5, 1, 1), (-3, 1, 1), (-1, 1, 1)。由 L 值转换到 J 值，再转换到 J_x 值， J_x 值与 L 值的关系见图 2。

由图 2 可以分析得出，不同色相区域的 CIECAM02 色貌空间的明度均匀性有了一定的提高，随着 L 值的变化，J 值增量趋于均等稳定。其中中性灰、偏绿、蓝红和蓝绿色相的明度均匀性优化后要优于其他色相优化后的明度均匀性。

2.3 彩度 c 的均匀性线性优化方法

选择 CIECAM02 中明度 J，色度坐标 a, b 构建初始的颜色空间 Jab，其中 $a=c\cos h$ ， $b=c\sin h$ 。式中：c, h 分别为 CIECAM02 中的彩度和色相角。

在 OSA-UCS 均匀颜色标尺系统中选取若干组 2 个相邻样本颜色之间只有彩度变化的样本颜色对，规定 2 个相邻样本颜色的 $\Delta c/\Delta E$ 必须大于 0.95，其中 Δc 为所选样本颜色在初始 CIECAM02 色貌空间的彩度差， ΔE 为所选样本颜色在初始颜色空间中的色差。也就是说在 CIECAM02 色貌空间的 OSA-UCS 样本颜色中筛选彩度变化占色差总变化为 95% 以上的相邻样本颜色对。

经过在 OSA-UCS 均匀颜色标尺系统中全面的筛选，最后筛选出 33 个符合条件的样本颜色对，见表 1。

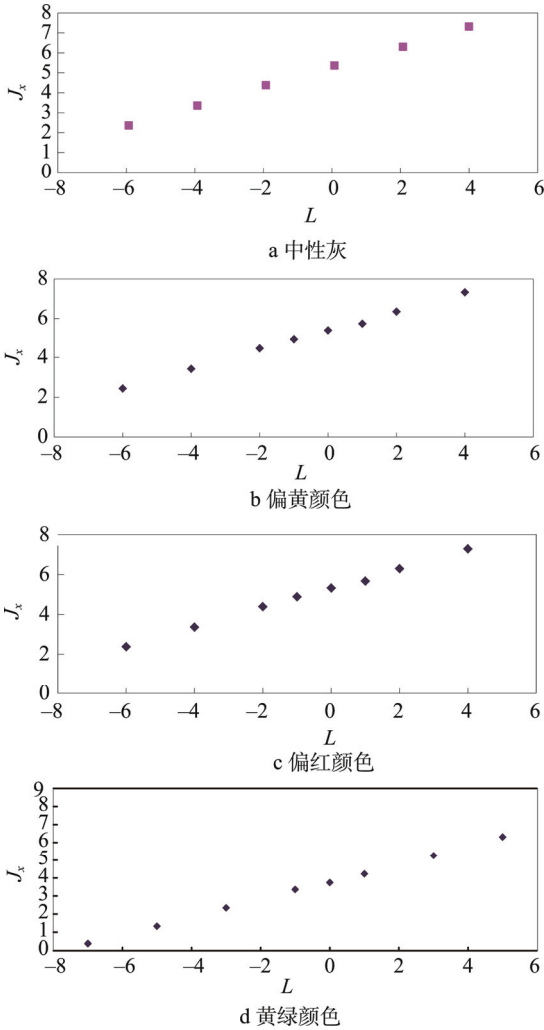


图 2 优化后不同明度颜色样本 L 与对应 J_x 的关系
Fig.2 Relation between L and J_x of samples with different brightness after optimization

表 1 33 个颜色样本对的坐标
Tab.1 Coordinates of 33 color sample pairs

序号	颜色样本对	序号	颜色样本对	序号	颜色样本对
1	(4,0,-2),(4,2,-4)	12	(-2,2,-2),(-2,4,-4)	23	(-5,-1,-5),(-5,-1,-3)
2	(4,0,0),(4,2,2)	13	(-2,-4,0),(-2,-2,0)	24	(-5,-1,1),(-5,-1,3)
3	(4,0,2),(4,0,4)	14	(-2,2,-10),(-2,2,-8)	25	(-5,1,-7),(-5,1,-5)
4	(4,2,-2),(4,4,-4)	15	(0,-6,0),(0,-4,0)	26	(-5,1,-5),(-5,1,-3)
5	(4,2,0),(4,4,0)	16	(0,-4,2),(0,-2,0)	27	(-5,1,-3),(-5,3,-5)
6	(5,1,-1),(5,3,-1)	17	(0,2,0),(0,4,0)	28	(-5,1,-1),(-5,3,-3)
7	(5,3,-1),(5,5,-1)	18	(0,2,2),(0,4,4)	29	(-5,1,1),(-5,3,3)
8	(3,-1,-5),(3,-1,-3)	19	(-5,-5,-1),(-5,-3,-1)	30	(-3,-5,-1),(-3,-3,-1)
9	(3,-1,-3),(3,-1,-1)	20	(-5,-5,3),(-5,-3,1)	31	(-3,-5,3),(-3,-3,1)
10	(3,-1,1),(3,-1,3)	21	(-5,-3,-3),(-5,-1,-1)	32	(-3,-1,-5),(-3,-1,-3)
11	(-2,-6,0),(-2,-4,0)	22	(-5,-3,3),(-5,-1,1)	33	(-3,3,-5),(-3,5,-7)

根据这些只有彩度变化的样本颜色对数据建立 $\Delta c/\Delta V$ 和 c 的散点关系见图 3, ΔV 为所选颜色样本对的视觉评估值, 因为在 OSA-UCS 均匀颜色标尺系统中, 相邻颜色样本的颜色视觉差异被实验证明了是相同的^[12], 文中所有颜色对的选择又都是基于相邻颜色样本^[13], 因此 ΔV 可以统一归一化为 1。在散点图中对 $\Delta c/\Delta V$ 和 c 作线性回归。

$\Delta c/\Delta V$ 和初始色貌空间的彩度 c 的关系见式 (7)。

$$\Delta c/\Delta V = -0.0454c + 19.239 \quad (7)$$

假设待建立的新彩度为 c_x , 则希望有 $\Delta c_x/\Delta V = (\Delta c_x/\Delta c) \times (\Delta c/\Delta V)$ 为常量, 即:

$$\frac{\Delta c_x}{\Delta c} = 1 / \left(\frac{\Delta c}{\Delta V} \right) \quad (8)$$

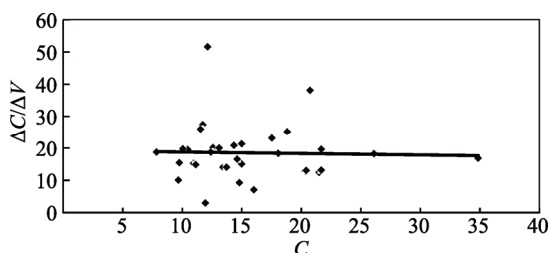


图 3 $\Delta c/\Delta V$ 和 c 的关系

Fig.3 Relation between $\Delta c/\Delta V$ and c

将式 (7) 代入式 (8), 并以微分形式表示, 则有:

$$dc_x = dc / (-0.0454c + 19.239) \quad (9)$$

$$c_x = \int_0^c dt / (-0.0454t + 19.239) = \frac{[\ln(19.239) - \ln(-0.0454c + 19.239)]}{0.0454} \quad (10)$$

对 a_x 和 b_x 坐标的计算, 是关于彩度 c 和优化后彩度 c_x 的函数, 见式 (11)。

$$\begin{aligned} a_x &= ac_x / c = a [\ln(19.239) - \ln(-0.0454c + 19.239)] / 0.0454c \\ b_x &= bc_x / c = b [\ln(19.239) - \ln(-0.0454c + 19.239)] / 0.0454c \end{aligned} \quad (11)$$

由式 (7) 和式 (11) 得到新的优化色貌空间 $J_x a_x b_x$ 的公式。

3 优化色貌空间 $J_x a_x b_x$ 均匀性检验

因为 OSA-UCS 系统中相邻颜色样本给人的视觉差异都是相同的, 可以通过在 OSA-UCS 系统中随机选取多组相邻颜色样本对来检验新优化色貌空间的均匀性^[14]。理论上, 多组相邻颜色样本对在新优化色貌空间中的色差离散度应该比初始色貌空间中的色差离散度低^[15]。

文中随机选取 40 组 (表 1) 相邻颜色样本对, 通过计算初始 CIECAM02 色貌空间的 40 个色差值和优化色貌空间的 40 个相应色差值, 将色差值离散点标示于同一图中, 见图 4。通过分析比较图 4, 可

以清晰的看出优化后色差的离散程度明显降低。

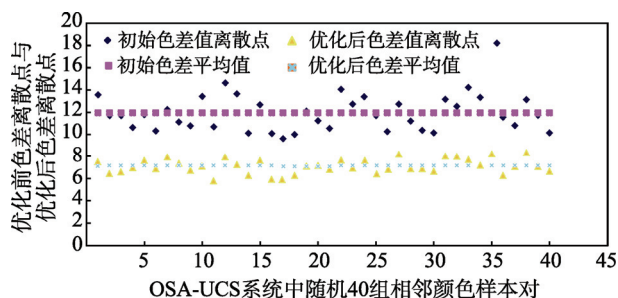


图 4 优化前色差离散点与优化后色差离散点的对比

Fig.4 Comparison of discrete point of color difference value before and after optimization

4 结语

在 CIECAM02-Jab 的基础上使用 OSA-UCS 数据集对明度、彩度进行了优化, 建立了新的优化色貌空间 $J_x a_x b_x$, 试验研究结果表明, 大部分样本颜色数据组的色差标准差在经过优化后都比优化前有所减小, 说明经优化后彩色图像色差的离散程度减轻, 空间更加趋于均匀, 修正了均匀颜色空间, 优化色貌空间在彩色图像复制时取得了较好的效果, 新的优化色貌空间 $J_x a_x b_x$ 的均匀性比 CAM02 初始色貌空间有了一定的提高。

参考文献:

- [1] 全清芬. 基于 iCAM 框架的彩色数字图像色差评价研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
TONG Qing-fen. Study of Color Difference Evaluation for Color Digital Images Based on iCAM Framework[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [2] 黄敏. 基于彩色印刷样品的颜色复制研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2008.
HAUNG Min. Study on Color Reproduction Based on Color Printing Sample[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2008.
- [3] 王丽丽. 基于 CIECAM02 色貌模型的印刷色差评价研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2010.
WANG Li-li. Research on Color-Difference Evaluation for Printed Sample Based on CIECAM02 Color Appearance Model[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2010.
- [4] 孟凡亚. CIECAM02 均匀性和色域映射算法研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2009.
MENG Fan-ya. CIECAM02 Uniformity and Color Gamut Mapping Algorithm[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2009.
- [5] 崔荣. 基于 CIECAM02 的均匀颜色空间改进[D]. 西安: 西安理工大学, 2007.
CUI Rong. Improvement of Uniform Color Space

- Based on CIECAM02[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2007.
- [6] MORONEY N, FAIRCHILD M D, HUNT R W G, et al. The CIECAM02 Color Appearance Model[C]// Proceedings of the 10th Color Imaging Conference, The Society for Imaging Science and Technology, New York: SPIE Press, 2002: 23—27.
- [7] 王东, 周世生. OSA-UCS 模型在色空间检测中的应用[J]. 武汉大学学报, 2008, 54(3): 321—324.
WANG Dong, ZHOU Shi-sheng. Application of OSA-UCS Model in Color Space Detection[J]. Journal of Wuhan University, 2008, 54(3): 321—324
- [8] INDOW T A. Test of Uniformities in the OSA-UCS and the NCS[J]. Color Res Appl, 2003, 28(4): 277—283.
- [9] LUO M R, CUI Gui-hua, LI Chang-jun. Uniform Color Spaces Based on CIECAM02 Colour Appearance Model[J]. Color Research and Application, 2006, 31(4): 320—330.
- [10] 徐敏, 郑元林, 戚永红, 等. 基于 Jab 空间的色差公式研究[J]. 包装工程, 2013, 34(9): 99—103.
XU Min, ZHENG Yuan-lin, QI Yong-hong, et al. Research on color Difference Formula Based on Jab Space[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(9): 99—103.
- [11] 张霞, 赵彩霞. 基于人工神经网络的 CMYK 到 CIECAM02 的转换[C]// 全国包装工程学术会议, 2010: 721—725.
ZHANG Xia, ZHAO Cai-xia. Study on CMYK to CIECAM02 Conversion Based on Artificial Neural Networks[C]// National Conference on Packaging Engineering, 2010: 721—725.
- [12] MACADAM D L. Colorimetric Data for Samples of OSA Uniform Color Scales[J]. Journal of the Optical Society of America, 1978, 68(1): 121—130.
- [13] NICKERSON D. Munsell Renotations for Samples of OSA Uniform Color Scales[J]. Journal of the Optical Society of America, 1979, 69(3): 1343—1347.
- [14] 刘真, 孟凡亚, 谢娴婷. CIECAM02 色貌模型的视觉均匀性分析与模型优化[J]. 影像科学与光化学, 2009, 27(2): 128—134.
LIU Zhen, MENG Fan-ya, XIE Xian-ting. Visual-Uniformity Analysis of CIECAM02 Color Appearance Model Optimization[J]. Imaging Science And Photochemistry, 2009, 27(2): 128—134.
- [15] XUE Y. Uniform Color Spaces Based on CIECAM02 and IPT Color Difference Equations[D]. New York: Rochester Institute of Technology, 2008.