

基于颜色属性相关性的图像色差公式的研究

许向阳^{1,2}, 张旭亮¹, 李 博¹

(1. 深圳职业技术学院, 深圳 518055; 2. 华南理工大学, 广州 510640)

摘要: CIE 色差公式不适合用于复杂图像对间色差预测, 为更准确地评价再现图像与原稿之间的颜色差别, 提出了一个基于颜色属性相关性的图像色差计算算法。算法的图像色差的计算, 采用对比度敏感度函数 (CSF) 去除图像内容中视觉难以觉察的信息, 降低图像内容的空间复杂性, 通过对图像对间颜色三属性的相关性分析, 确定各色彩属性差的权重。心理物理实验证实, 色差公式计算值与主观评价的评分是一致的, 表明该算法可用于评价图像对间的颜色差别, 也可用于评价压缩方式、图像增强算法以及色域映射算法等的性能。

关键词: 图像处理; 色差; 图像色差; 颜色视觉

中图分类号: TS807; TS801.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2013)13-0098-04

Image Color Difference Formula Based on Correlation of Color Attribute

XU Xiang-yang^{1,2}, ZHANG Xu-liang¹, LI Bo¹

(1. Shenzhen Polytechnic, Shenzhen 518055, China; 2. South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The CIE color difference formula is not suitable for predicting color difference between complex images. In order to quantify color differences between the original and reproduction, an image difference algorithm based on correlation of image attribute was put forward. The formula used the Contrast Sensitivity Functions (CSF) to reduce the spatial complexity. The CSF was used to remove information that is imperceptible to the visual system. The algorithm determined the color attribute weights by means of correlation analysis between image pairs. Psychophysical experiments confirmed that the metric correlates strongly with human perception. It was concluded that the algorithm can be used to assess the performance of color image compression, color image enhancement algorithms, gamut mapping algorithms and so on.

Key words: image processing; color difference; color difference between image; color vision

色差研究的目的是用一个数字评价 2 个对象之间的颜色差别。为便于颜色工业的应用, CIE 早期推荐了 2 个色差公式: 1976CIELAB 和 1976CIELUV^[1], 都是直接用相应颜色空间中两点之间的距离表示。由于 CIELAB 和 CIELUV 都不是视觉上完全均匀的颜色空间, 两点之间的距离不能表示视觉差。接着 CIE 又推出了 CIE DE94^[2] 和 CIE DE2000^[2], CIE DE2000 公式的推出, 致使对色差的研究达到了全新的阶段。这些色差公式实现了物理测量值到感知色差的转换。但这些复杂的公式仅能预测既定条件下简单色块之间的感知差别, 不能预测具有空间复杂性的图

像间的色差。S-CIELAB^[4] 模型的提出, 代表了第 1 个图像色差计算公式, 该模型是对传统基于色块色差公式的扩展, 把图像像素作为独立的对象, 计算色差前增加了空间预处理函数 (CSF), CSF 可以去除图像中人眼视觉觉察不到的信息。S-CIELAB 模型已被模块化^[5], 可以通过增加或者修改相应的模块开发图像色差计算公式。iCAM^[6-7] 图像色貌模型可用于图像质量测量, 该模型采用了 S-CIELAB 的图像空间预处理的步骤, 结合了 IPT^[8] 均匀颜色空间的性能, 最终逐个像素计算图像的色差。笔者基于 S-CIELAB 图像色差框架的理念, 提出一种新的色差

收稿日期: 2013-05-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61108087); 深圳职业技术学院校级青年创新项目 (2213K3040013)

作者简介: 许向阳 (1979-), 男, 河南人, 深圳职业技术学院讲师, 主要从事印刷包装工程的教学与研究。

通讯作者: 张旭亮 (1966-), 男, 浙江人, 深圳职业技术学院副教授, 主要从事印刷包装工程的教学与研究。

计算算法。

1 新算法的计算流程

图像色差模型的框架已经提出^[9],该模型是在传统色差公式的基础上添加了空间预处理过程。空间预处理的步骤是可以扩展的,具有很大的灵活性。其实质是把图像色差的计算分成了2个部分:一是图像处理,对图像进行空间滤波,滤波器的设计模拟了人眼的一些视觉特性,经过滤波后的图像即是满足了人眼某方面的视觉特征,如 S-CIELAB 色差计算和 iCAM 图像质量测量,使用 CSF 函数进行人眼视觉中空间频率的行为模拟;二是逐个像素进行色差计算,色差的计算可用 CIE 推荐的色差公式,结果使用统计的方法进行,色差值可以用所有像素色差的均值,表示整体偏差,也可以用最大值表示,表示最大的偏差等。鉴于图像色差模型,设计了如下的框架计算图像对之间的色差,见图1。

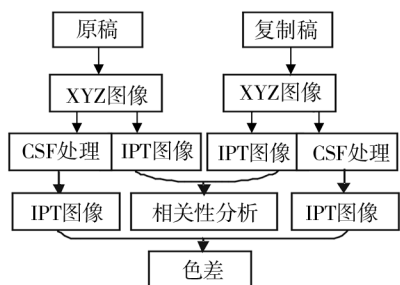


图1 图像对色差计算框架

Fig.1 The color difference calculation framework of image pair

该框架继承了 iCAM 图像质量测量的特征,首先对图像对进行颜色空间转换,转换到 CIEXYZ 颜色空间,得到 XYZ 图像对。在 CIEXYZ 颜色空间中进行空间滤波处理,得到 CSF 滤波后的图像对,将该图像对进行颜色空间转换,得到空间预处理的图像对,即是用于色差计算的原始数据。同时,再将 XYZ 图像对直接转换到 IPT 图像对,在 IPT 颜色空间中进行颜色相关性分析,计算相关性系数。最后色差用 IPT 色差表示,因为 IPT 颜色空间相对于 CIEXYZ 和 CIELAB 更加均匀,空间两点之间的距离能更准确地表示均匀色块的色差,IPT 颜色空间的性能以及转换算法见文献8。图像色差核心算法主要包括三方面:CSF 空间预处理、IPT 颜色空间转换和颜色三

属性相关性计算。

2 基于颜色属性相关性的图像色差计算原理

新色差计算算法最大的创新点就是基于图像颜色属性进行相关性分析,求出图像颜色三属性各自的相关性系数,作为权重系数用于计算图像的色差。原稿和复制稿的颜色差别,可理解为两幅图像之间的颜色相似性,相似性的含义包括图像对在颜色数值上的差别和在空间分布上的差别。图像在颜色数值上的差别用均值来反映整体偏差,在空间分布上的差别用相关性系数衡量。相关性分析在 IPT 颜色空间中进行,IPT 颜色空间是正交的,等同于分析颜色三属性:色相、明度、饱和度的相关性,也即是图像对的色相相关性、明度相关性、饱和度的相关性。在数学上等同于分析两组数据的相关性,可用二元数据的相关系数表示:

$$r_{xy} = \frac{s_{xy}}{\sqrt{s_{xx}} \sqrt{s_{yy}}}$$

式中: r_{xy} 表示二元数据的相关系数; s_{xy} 表示二元数据的协方差; $\sqrt{s_{xx}}$ 和 $\sqrt{s_{yy}}$ 表示方差。相关系数 $|r_{xy}| \leq 1$,相关系数的数值能够反映空间二元数据之间的相似程度。如果相关性数的绝对值为1,表明空间二元数据是相等的,对于图像对之间颜色属性的差别来说,即是相关颜色分量是相等的。相关系数的绝对值越小,可表明图像对的颜色分量数据在空间的分布差别就越大,即图像对之间的颜色差别就越大。

无论 S-CIELAB 还是 iCAM,在计算图像对的色差时,都是取图像对像素值差的平均值作为图像色差。均值仅是反映图像对数据集中位置的差别,不能反映图像数据空间分散性的特征。图像颜色属性是具有空间相关的,为获得图像对之间的颜色差别,分析图像对颜色数据空间分布的差别比获得颜色数据集中位置的差别更有意义,也即是说,均值不能完全代表图像对之间的色差。由此,在传统图像对色差公式的基础上,对图像对各颜色属性差的均值加权,建立了修正的图像色差公式。权重系数是图像对各个颜色属性间的相关系数。因此,图像对之间的色差计算公式依据传统的色差公式修正为:

$$\Delta E = \sqrt{\frac{\Delta I^2}{I_r} + \frac{\Delta P^2}{P_r} + \frac{\Delta T^2}{T_r}} \quad (3)$$

式中: ΔE 表示图像对之间的色差; ΔI 表示图像

对之间明度差别的平均值; ΔP 和 ΔT 表示图像之间色度差的平均值; I_r 表示 I 分量的相关性系数, P_r 表示 P 分量间的相关性系数, T_r 表示 T 分量间的相关系数。

3 新色差公式的评价实验

为验证新的图像色差算法的性能,进行心理物理实验评价该算法^[10-12]。从 ISO SCID 400 标准图像中挑选 5 副典型图像,分别是 Grey Neutrals(用 N1 表示)、Memory Colours(用 N2 表示)、Painting Kids(用 N3 表示)、Red Couch(用 N4 表示)、ski(用 N5 表示)。这 5 副图像代表了不同类型的图像,包含了记忆色(天空、草地、肤色等),鲜艳色(鲜艳衣服、色块等)以及中性色(布匹等),可以检验视觉对不同内容图像的色差感觉。原图是 RGB 图像模式,内嵌 sRGB 特性文件,在 sRGB 工作空间使用不同的幂函数进行颜色调整,变换函数为:

$$Out = \max(in) \times \left(\frac{in}{\max(in)} \right)^\alpha \tag{4}$$

式中: Out 为计算结果; in 表示输入值; α 表示调整参数,取值依次为 0.95,0.85,0.80,0.75,从而得到有视觉差的 20 对图像。每幅图像通过不同的幂函数调整得到 4 副结果图像,给予编号为 img1, img2, img3, img4。

3.1 图像对差别的主观评价实验

主观评价采用 EIZO ColorEdge CG21 液晶显示器, $r=2.2$,白点 D56,使用 ProfileMaker5.0 对显示器进行屏幕校正,颜色测量仪器使用 GretagMacbeth Eye-One,平均色差 $\Delta E \leq 1$ (CIE LAB),最大色差 $\Delta E \leq 2$,环境照度为 200~300 lx,观察背景为中性灰色。选择 10 个观察者,每个观察者重复 3 次实验,每次观察前显示器预热半小时以上,观察者在观察环境适应半小时以上,校正显示器色差 $\Delta E \leq 2$ 。观察者对所有图像的评价都是相对于源图像进行的,将处理好的图像以幻灯片的方式播放,使用 ACDSee 软件按照随机顺序播放。目视色差的判断分为 5 个等级,见表 1。

10 名观察者,对 5 幅图像建立的 4 个测试图像对重复 3 次观察实验的平均分数见表 2,平均分代表了 10 名观察者对图像对之间颜色差别的判别量级,平均分数值大说明 2 幅图像差别大,平均分数值小说明 2 幅图像的差别小。

表 1 主观观察色差等级标准

Tab.1 The color difference level of subjective observation

视觉感受	评分
无可察觉的差别感	0
刚有可察觉的差别感,此时似有似无,不明显或者不确定	1
有微弱的差别感,可以确定存在	2
稍有明显的差别感,但认为差别在可接受范围之内	3
有明显的差别感,差别不可接受	4

表 2 主观评价结果

Tab.2 The result of subjective evaluation

测试 图像	主观评价分数			
	img1	img2	img3	img4
N1	1.17	1.47	1.9	2.63
N2	1.4	1.57	2.07	2.73
N3	1.1	1.57	2.07	4.13
N4	1.33	1.93	2.3	2.83
N5	0.97	1.4	1.97	2.4

3.2 图像对差别的客观数据

色差计算值在 5 副源图像与相应的 4 副结果图像之间进行,图像对之间的色差见表 3,色差值小说明 2 幅图像的差别小,色差值大说明两幅图像的差别大。

表 3 客观评价结果

Tab.3 The result of objective evaluation

测试 图像	新色差算法结果(IPT)			
	img1	img2	img3	img4
N1	0.66	1.34	2.04	2.78
N2	0.43	0.87	1.32	1.78
N3	0.51	1.01	1.52	2.06
N4	0.66	1.34	2.04	2.78
N5	0.42	0.86	1.33	1.84

为了进一步评价新算法的性能,测试图像对的 S-CIE LAB 色差值见表 4。

表 4 S-CIE LAB 评价结果

Tab.4 The evaluation result of S-CIE LAB

测试 图像	S-CIE LAB 色差算法结果			
	img1	img2	img3	img4
N1	2.16	4.27	6.61	9.15
N2	2.05	3.96	5.97	8.05
N3	3.78	7.00	9.75	12.67
N4	1.95	4.10	6.12	8.68
N5	2.49	4.93	7.52	10.11

从上述 3 个表中给出的主观评价分数和色差计算值在结果上看:无论是新色差算法的色差值,还是 S-CIELAB 算法的色差值,都按照图像编号 img1, img2, img3, img4 的次序色差值在变大;主观评价的平均分差值也是按照图像编号 img1, img2, img3, img4 的次序分数在增大。表观上数据变化趋势是一致的。客观计算结果与主观评分数的一相关性越好,说明该算法的性能就越优,相关系数分析结果见图 2。

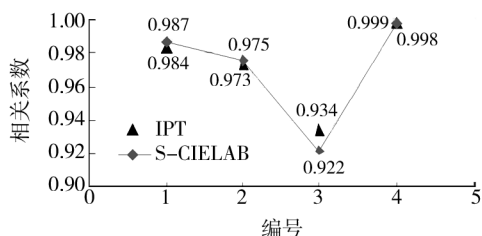


图 2 主观与客观评价结果相关分析结果

Fig. 2 The correlation analysis results of subjective and objective evaluation

结果表明,2 个算法的计算结果和主观评价结果的相关性基本一致的,对于 img3 来说新色差计算结果相对于 S-CIELAB 来说要优。但是 S-CIELAB 计算的色差普遍大于新算法的色差和主观评价的平均分,以视觉差等级作为判断标准分析,则新算法的色差值相对于 S-CIELAB 的结果,更加符合人眼视觉等级差的感受。S-CIELAB 计算结果多数 $\Delta E \geq 4$, 依此判断的话就是绝大多图像都是“有明显的差别感,差别不可接受”,与主观评分的判断结果相悖。

4 结论

基于图像内容的色差算法的计算结果与人眼对图像质量感知差别的一致性较好,相对好于 S-CIELAB 算法。该算法可用于评价图像压缩方式、图像增强算法以及色域映射算法等的性能。然而要保证图像对色差计算的单位量值与视觉感知差别的量值的完全一致性,还要选择大量的不同特征的图像,进行大量的视觉心理物理实验,建立有效的主观评价数据集,添加基于人眼视觉的空间预处理函数,不断地修正图像对色差计算的模型,以期建立图像色差的视觉等差模型。

参考文献:

- [1] CIE. Colorimetry. 2nd Ed. CIE Publ. No. 15. 2. Central Bureau of the CIE; 1986.
- [2] CIE. Technical Report: Industrial Color-difference Evaluation. CIE Pub. No. 116. Vienna; Central Bureau of the CIE, 1995.
- [3] CIE. Technical Report: Improvement to Industrial Color-difference Evaluation. CIE Pub. No. 142-2001. Vienna; Central Bureau of the CIE, 2001.
- [4] ZHANG X, WANDELL B A. A Spatial Extension to CIELAB for Digital Color Image Reproduction. In: Proceedings of the SID Symposiums, 1996, 27: 731-734.
- [5] JOHNSON G M, FAIRCHILD M D. On Contrast Sensitivity in an Image Difference Model. Proc. of IS&T PICS Conference, 2001: 18-23.
- [6] FAIRCHILD M D, JOHNSON G M. The iCAM Framework for Image Appearance, Image Differences, and Image Quality [J]. J of Electronic Imaging, 2004, 13: 126-138.
- [7] FAIRCHILD M D, JOHNSON G M. Image Appearance Modeling. In: Proc. SPIE/IS & T Electronic Imaging Conference. SPIE, 2003: 149-160.
- [8] EBNER F, FAIRCHILD M D. Development and Testing of a Color Space (IPT) with Improved Hue Uniformity. IS&T/SID 6th Color Imaging Conference. Scottsdale, 1998: 8-13.
- [9] JOHNSON G M, FAIRCHILD M D. Darwinism of Color Image Difference Models, Proc. of IS&T/SID 9th Color Imaging Conference, 2001: 108-112.
- [10] 于惠, 刘真. 基于混合色适应转换的图像色差模型研究 [J]. 包装工程, 2013, 34(3): 21-25.
YU Hui, LIU Zhen. Research of Image Color Difference Model Based on Mixed Chromatic Adaptation Transform [J]. Packaging Engineering, 2013, 34(3): 21-25.
- [11] 刘士伟, 于惠. 一种基于色相角算法的图像质量评价模型 [J]. 包装工程, 2012, 33(17): 94-97.
LIU Shi-wei, YU Hui. Image Quality Evaluation Model Based on Hue Angle Algorithm [J]. Packaging Engineering, 2012, 33(17): 94-97.
- [12] 刘浩学, 黄敏, 武兵, 等. 色差公式在评价显示图像颜色中有效性的测试 [J]. 北京印刷学院学报, 2008, 16(6): 27-40.
LIU Hao-xue, HUANG Min, WU Bing, et al. Test of Validity of Color Difference Formulae in Evaluating Color Accuracy of Displayed Images [J]. Journal of Beijing Institute of Graphic Communication, 2008, 16(6): 27-40.