

## 一种新的 RGB 色差度量公式

杨振亚<sup>1</sup>, 王 勇<sup>2</sup>, 杨振东<sup>3</sup>, 王成道<sup>1</sup>

(1. 华东师范大学 信息科学与技术学院, 上海 200241; 2. 复旦大学 计算机科学系, 上海 200433;

3. 太原理工大学 电气与动力工程学院, 太原 030024)

(zyyang@ee.ecnu.edu.cn)

**摘 要:**从 RGB 颜色空间入手, 在对现有的几种 RGB 色差度量公式分析对比的基础上, 总结出 RGB 颜色色差的 3 个基本规律, 提出颜色分量的重要程度这一概念。并根据颜色分量的重要程度用动态系数调整 RGB 颜色间的空间距离和矢量角度值, 从而得到了一种全新的 RGB 颜色空间的色差度量公式。通过高复杂度图像的颜色量化实验证明该色差公式在颜色量化中的性能优于目前使用较为广泛的几种 RGB 色差度量公式。

**关键词:**颜色量化; 色差; 颜色空间; 颜色分量; 动态聚类

**中图分类号:** TP391 **文献标志码:** A

## A new color difference formula in RGB color space

YANG Zhen-ya<sup>1</sup>, WANG Yong<sup>2</sup>, YANG Zhen-dong<sup>3</sup>, WANG Cheng-dao<sup>1</sup>

(1. School of Information Science and Engineering, East China Normal University, Shanghai 200241, China;

2. Department of Computer Science, Fudan University, Shanghai 200433, China;

3. College of Electrical and Power Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan Shanxi 030024, China)

**Abstract:** Based on the study of RGB (red-green-blue) color space and the comparison and analysis of several color difference formulas in RGB color space, this paper summarized three rules of color difference in RGB color space and proposed the conception of the importance of the color component. A new color difference formula in RGB color space was achieved by dynamically adjusting the vector distance and angular between a pair of RGB colors. The dynamic coefficient was weighted by the importance of color component. Color quantization experiment of highly complex color images demonstrates that this new color difference formula's performance is better than those widely used color difference formulas in RGB color space.

**Key words:** color quantization; color difference; color space; color component; dynamic clustering

## 0 引言

随着计算机技术和互联网的迅速发展, 彩色图像广泛应用于工业、农业、军事、医学等各个领域。而颜色空间作为彩色图像中颜色表示的基础, 其重要性日益凸现, 现有的颜色空间种类繁多, 各具特色。其中 RGB 颜色空间是目前使用最为广泛的颜色空间, 它和多数图像采集、显示设备的色彩方式吻合, 颜色值获取方便, 各分量均用 8 位 2 进制整型数表示, 便于存储和计算, 其他各种颜色空间均需要以它为基础转换得到。

但 RGB 颜色空间也存在颜色间的色差度量不精确这一重大缺陷, 由于颜色间的色差度量是彩色图像处理技术中一项非常重要的内容, 在图像压缩存储、传输、检索、显示和绘制等方面有着极其广泛的应用背景。所以 RGB 颜色空间的这一缺陷严重制约了它的应用前景。

为了利用 RGB 颜色简洁、高速、对硬件条件要求小的优势, 本文对 RGB 颜色空间色差度量公式给予了改进, 提出一种新的基于 RGB 颜色空间内颜色间空间距离和矢量角度的色差度量公式, 通过复杂图像的颜色量化实验证明了该色差公式的有效性。

## 1 现有 RGB 色差度量公式及其性能

现有的 RGB 色差度量公式主要有三类:

1) RGB 色差公式<sup>[1]</sup>: 其定义如下: RGB 颜色空间中两个颜色, 坐标分别为  $x_i = (r_i, g_i, b_i)$  和  $x_j = (r_j, g_j, b_j)$ , 两者间色差为:

$$D(x_i, x_j) = \sqrt{(r_i - r_j)^2 + (g_i - g_j)^2 + (b_i - b_j)^2} \quad (1)$$

即以两者间的空间距离作为色差值。

2) RGB 加权色差公式: 由于 RGB 颜色空间不是均匀颜色空间, 按照空间距离得到的色差并不完全符合人的视觉, 在实际应用时经常采取给各颜色分量加上一定权值的办法, 如式(2)所示:

$$D(x_i, x_j) = \sqrt{w_r(r_i - r_j)^2 + w_g(g_i - g_j)^2 + w_b(b_i - b_j)^2} \quad (2)$$

$w_r, w_g, w_b$  是加权系数, 多数文献中  $(w_r, w_g, w_b)$  取值为 (3, 4, 2)<sup>[1-2]</sup>, 文献[3] 取值为 (3, 6, 1), 文献[4] 取值为 (4, 8, 1), 文献[5] 取值为 (2, 1, 4)。

3) RGB 角距离色差公式: RGB 空间任意两个颜色, 坐标分别为  $x_i = (r_i, g_i, b_i)$  和  $x_j = (r_j, g_j, b_j)$ , 其色差定义为:

$$D(x_i, x_j) = 1 -$$

收稿日期: 2008-09-01; 修回日期: 2008-10-21。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60807035)。

作者简介: 杨振亚 (1972-), 男, 河南洛阳人, 讲师, 博士研究生, 主要研究方向: 图像处理、人工智能; 王勇 (1967-), 男, 上海人, 副教授, 主要研究方向: 计算机视觉、人工智能; 杨振东 (1980-), 男, 河南洛阳人, 助教, 主要研究方向: 图像处理; 王成道 (1936-), 男, 山东济南人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 计算机视觉、人工智能、智能交通。

$$\left[1 - \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left( \frac{x_i \cdot x_j}{|x_i| |x_j|} \right) \right] \left[1 - \frac{|x_i - x_j|}{\sqrt{3} \cdot 255^2} \right] \quad (3)$$

若  $x_i$  和  $x_j$  共线, 则仅考虑矢量距离, 式(3) 转化为式(4)<sup>[6-7]</sup>:

$$D(x_i, x_j) = \frac{|x_i - x_j|}{\sqrt{3} \cdot 255^2} \quad (4)$$

该式特点在于引入了待比较颜色间的角度差。

按式(1), 每个颜色的等色差颜色应在 RGB 颜色空间中成一个球面, 且不同位置的等色差颜色对应应该表现出相同的差异。但是这种情况在整个 RGB 颜色空间中并不成立, 以空间距离表示的色差不符合人的视感。

由于 RGB 颜色空间不够均匀, 大量文献按式(2) 采取加权的方式来解决这个问题。加权思想来源于根据人眼对红、绿、蓝三原色敏感程度的不同来定义权值, 调整 RGB 颜色空间, 部分地补偿其非均匀性<sup>[8-9]</sup>。一些颜色量化文献(如[10, 11]) 在颜色切分中按照 2:1:4 的比例来约束子立方体中的 R、G、B 三维的作法也是这种加权思想的体现。但是以往文献多将注意力集中在所处理的某类简单图像上, 从而导致采用的加权系数多种多样。实验证明各种加权算法并非总是优于非加权算法, 且改进程度有限。可见, 由于红、绿、蓝 3 色并不独立, 所以 3 个坐标轴上的色差规律并不能简单地推广到整个颜色空间, 简单地加权并非普适性的解决办法。

式(3) 考虑了待比较颜色间的角度差, 实验证明它比式(1)、(2) 对 RGB 色差度量有一定的改善, 但是效果也不够理

$$dist = \sqrt{\frac{S_r^2 \cdot w_r \cdot (r_1 - r_2)^2 + S_g^2 \cdot w_g \cdot (g_1 - g_2)^2 + S_b^2 \cdot w_b \cdot (b_1 - b_2)^2}{(w_r + w_g + w_b) \cdot 255^2} + S_\theta \cdot S_{ratio} \cdot \theta^2} \quad (5)$$

式(5) 中各系数的意义和计算公式如下:

$w_r, w_g, w_b$  是人眼对红、绿、蓝三分量变化的敏感程度加权系数, 此处  $(w_r, w_g, w_b)$  取值为(1, 2, 1)。

$S_r, S_g, S_b$  表示各个分量的重要性程度:

$$S_r = \min \left( \frac{r_1 + r_2}{\sum (r, g, b)}, 1 \right) \quad (6)$$

$$S_g = \min \left( \frac{g_1 + g_2}{\sum (r, g, b)}, 1 \right) \quad (7)$$

$$S_b = \min \left( \frac{b_1 + b_2}{\sum (r, g, b)}, 1 \right) \quad (8)$$

$$\sum (r, g, b) = \frac{1}{3} (r_1 + r_2 + g_1 + g_2 + b_1 + b_2) \quad (9)$$

$\theta$  代表两个待比较的颜色在 RGB 空间的矢量角度的归一化。

$$\theta = \frac{2}{\pi} \arccos \left( \frac{r_1 \cdot r_2 + g_1 \cdot g_2 + b_1 \cdot b_2}{\sqrt{(r_1^2 + g_1^2 + b_1^2) \cdot (r_2^2 + g_2^2 + b_2^2)}} \right) \quad (10)$$

$S_\theta$  用来考查红、绿、蓝三分量变化对两个待比较颜色在 RGB 空间的矢量角度的贡献, 依据各个分量重要性程度来调整角度  $\theta$ 。

$$S_\theta = S_{\theta_r} + S_{\theta_g} + S_{\theta_b} \quad (11)$$

$$S_{\theta_r} = \frac{\frac{|r_1 - r_2|}{r_1 + r_2}}{\frac{|r_1 - r_2|}{r_1 + r_2} + \frac{|g_1 - g_2|}{g_1 + g_2} + \frac{|b_1 - b_2|}{b_1 + b_2}} \cdot S_r^2 \quad (12)$$

$$S_{\theta_g} = \frac{\frac{|g_1 - g_2|}{g_1 + g_2}}{\frac{|r_1 - r_2|}{r_1 + r_2} + \frac{|g_1 - g_2|}{g_1 + g_2} + \frac{|b_1 - b_2|}{b_1 + b_2}} \cdot S_g^2 \quad (13)$$

想。

由于现有的 RGB 色差度量公式效果不佳, 所以有必要加以改进。

## 2 基于 RGB 空间距离和角度的色差公式

通过对 RGB 颜色空间和现有的 RGB 色差度量公式的研究, 本文总结出 RGB 颜色色差的几个易于公式化的规律:

1) 人眼对 RGB 颜色红、绿、蓝三分量变化的敏感程度不同, 总体来说, 人眼对绿色分量变化较红、蓝两分量变化更敏感。但在 RGB 空间的某些区域, 人眼对红、蓝变化会更为敏感。

2) RGB 颜色空间中 2 个颜色的色差同它们之间的空间距离和它们之间的矢量角度均有联系, 单纯考虑空间距离是不够的。

3) RGB 颜色的 3 个分量的重要程度是不同的, 这种不同并非指某个固定比例关系, 而是根据颜色中各分量的实际取值决定, 相对强度较高的分量的重要程度也较高。计算色差时必须考虑到主、从分量的区分。

为较好的用公式化的形式体现这 3 个规律, 在大量实验的基础上, 本文得出如下形式的 RGB 颜色空间色差计算公式:

RGB 颜色空间中两个颜色, 坐标分别为  $x_1 = (r_1, g_1, b_1)$  和  $x_2 = (r_2, g_2, b_2)$ , 则两者间色差为:

$$S_{\theta b} = \frac{\frac{|b_1 - b_2|}{b_1 + b_2}}{\frac{|r_1 - r_2|}{r_1 + r_2} + \frac{|g_1 - g_2|}{g_1 + g_2} + \frac{|b_1 - b_2|}{b_1 + b_2}} \cdot S_b^2 \quad (14)$$

$S_{ratio}$  用于调整系数防止在 RGB 空间底部  $\theta$  过大。

$$S_{ratio} = \frac{\max(r_1, r_2, g_1, g_2, b_1, b_2)}{255} \quad (15)$$

通过这些系数的运用, 我们将 RGB 色差公式由原来的固定权值改进为能够依据不同情况进行权值调整, 这种动态权值的作用是补偿 RGB 空间的不均匀性。

## 3 几种色差公式的颜色量化对照实验

本文通过高复杂度图像的 K 均值动态聚类颜色量化来对色差公式的性能进行验证。RGB 加权色差公式中权值  $(w_r, w_g, w_b)$  取值为(3, 4, 2)。

### 3.1 实验图像的选择

本文采用我们人工构造的高复杂度图像集作为实验对象。图像集中的 12 幅基本图像(图 1), 每幅均由几十到上百幅常规图像所组成, 大小压缩到 1024 × 768。每幅基本图像包含的 RGB 颜色数达 42 ~ 52 万种。为进一步提高图像的复杂程度, 我们还利用 12 幅基本图像组合成 12 幅包含颜色数达 110 ~ 120 万种的 4 组合图像以及 12 幅包含颜色数达 140 ~ 160 万种的 6 组合图像。这些图像中基本包含了自然界中所有常见的颜色种类, 并且图像中颜色的分布规律各不相同, 可全面充分的验证各种色差公式在整个颜色空间的性能。

### 3.2 颜色量化效果的评价标准

鉴于本文实验图像高度复杂, 单纯的肉眼评价难以做到

客观全面,而 CIEDE2000 色差公式<sup>[12-14]</sup>被普遍认为是目前最好的色差公式,和人眼的吻合程度在 95% 以上,虽然 CIEDE2000 色差公式的运算极为复杂,本文还是以量化前后图像间的 CIEDE2000 色差的均方误差为标准对颜色量化的效果进行评估。

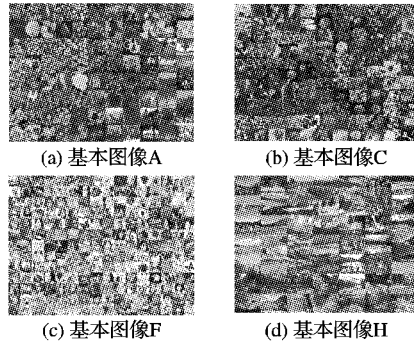


图1 实验图像集中12幅基本图像中的4幅

CIEDE2000 色差公式形式如下:

$$\Delta E_{00} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L'}{k_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C'}{k_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H'}{k_H S_H}\right)^2 + R_T \left(\frac{\Delta C'}{k_C S_C}\right) \left(\frac{\Delta H'}{k_H S_H}\right)} \quad (16)$$

### 3.3 实验数据

本文对总数 36 幅的实验图像进行量化实验,把图像的颜色数目压缩为 64 种。64 色压缩代表中、大距离的色差度量和压缩。本文的实验图像颜色种类繁多,涵盖了颜色空间的绝大部分,更进一步的压缩将导致很大的误差,不具实际意义。

下列各表是基本图像和组合图像按各色差公式量化至 64 色的 CIEDE2000 色差的实验结果,色差单位均为 CIEDE2000 单位色差。

表1 基本图像量化至 64 色的 CIEDE2000 色差均方误差

基本图像	RGB	RGB(342)	RGB 角距离	本文公式
基本图像 A	8.320974	8.507323	8.248932	7.328474
基本图像 B	8.191123	8.267717	7.931293	7.268356
基本图像 C	7.934893	7.808615	7.611979	6.759410
基本图像 D	8.399759	7.695076	7.795072	6.687525
基本图像 E	7.825548	7.997663	7.539413	6.963608
基本图像 F	8.600515	8.403620	8.142643	7.457590
基本图像 G	7.952169	7.271038	7.216819	6.640098
基本图像 H	8.216513	7.979450	7.879656	6.984301
基本图像 I	8.766207	8.472284	8.110525	7.688958
基本图像 J	8.911422	8.253472	8.208045	7.423795
基本图像 K	8.694119	8.455534	7.992386	7.462893
基本图像 L	8.494555	8.492898	8.776952	7.185732

表2 12幅基本图像量化至 64 色的色差均方误差的均值与方差

色差公式	均方误差均值	均方误差方差
RGB	8.358983	0.334357
RGB(342)	8.133724	0.373782
RGB 角距离	7.954476	0.382310
本文公式	7.154228	0.328319

表3 24幅组合图像量化至 64 色的色差均方误差的均值与方差

色差公式	均方误差均值	均方误差方差
RGB	9.217688	0.350332
RGB(342)	8.889526	0.461261
RGB 角距离	8.835983	0.460370
本文公式	7.919035	0.360034

表4 36幅图像量化至 64 色的色差均方误差的均值与方差

色差公式	均方误差均值	均方误差方差
RGB	8.923275	0.533964
RGB(342)	8.630394	0.562512
RGB 角距离	8.533752	0.603707
本文公式	7.656816	0.503912

从颜色量化实验数据可以看出,本文色差公式的应用效果和稳定性均明显优于其他对照公式。总体来说,通过这种大量随机数据,无人工干预的实验,证明了本文色差公式的有效性。

## 4 结语

本文色差公式完全基于 RGB 颜色空间,通过动态权值的调整补偿了 RGB 颜色空间的不均匀性。有效提高了 RGB 颜色空间内色差度量的精确程度,避免颜色空间转化所需要花费的内存空间和计算时间。

但是本文色差公式毕竟尚不成熟,有待于在性能上进一步提高,并尽可能地加以简化,而且需要在其他一些应用领域进行验证,我们将继续对此进行研究。

### 参考文献:

- [1] 李贵俊,刘正熙,游志胜,等.一种基于色差和彩色归一化的车身颜色识别算法[J].计算机应用,2004,24(9):47-49.
- [2] 田杰,吕建新,周晓娟,等.位图的图像处理技术[J].现代电子技术,2001(9):28-30.
- [3] 凌卫新,凌玲.关于图像色彩压缩的一种新聚类算法[J].计算机工程,1996,23(4):8-15.
- [4] 凌玲.彩色图像量化方法的研究[J].华南理工大学学报:自然科学版,2000,28(1):81-85.
- [5] 贾秋菊,王小铭.一种动态切分的颜色量化算法[J].华南师范大学学报:自然科学版,2005(1):46-49.
- [6] ANDROUTSOS D, PLATANIOTIS K N, VENETSANOPOULOS A N. A novel vector based approach to color image retrieval using a vector angular based distance measure[J]. Computer Vision and Image Understanding, 1999, 75(1):46-58.
- [7] ANDROUTSOS D, PLATANIOTIS K N, VENETSANOPOULOS A N. Vector angular distance measure for indexing and retrieval of color [C]// SPIE proceedings series: Storage and retrieval for image and video databases VII. San Jose CA: SPIE, 1999, 3656: 604-613.
- [8] XIANG ZHIGANG, GREORY JOY. Color image quantization by agglomerative clustering[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 1994, 14(3):44-48.
- [9] 赵燕伟,王万良.基于聚类分析的彩色量化新算法及其应用[J].计算机辅助设计与图形学学报,2000,12(5):340-343.
- [10] 王秀娟,高兆法,欧宗瑛.彩色图像颜色量化的优化[J].大连理工大学学报:自然科学版,1998,38(1):50-53.
- [11] 顾尔丹,许端清,陈纯.结合 Gamma 修正的彩色量化新算法[J].计算机辅助设计与图形学学报,2002,14(4):356-360.
- [12] CIE Publication No. 142-2001. Improvement to industrial colour-difference evaluation [M]. Vienna: Central Bureau of the CIE, 2001.
- [13] LUO M R, CUI G, RIGG B. The development of the CIE 2000 colour difference formula: CIEDE2000[J]. Color Research and Application, 2001, 26(5):340-350.
- [14] 郑元林,刘士伟.最新色差公式 CIEDE2000[J].印刷质量与标准化,2004,12(7):34-37.