

文章编号 1004-924X(2006)02-0261-05

数字影像输出设备色域边界的插值计算方法

徐艳芳^{1,2}, 刘文耀²

1. 北京印刷学院 印刷与包装工程学院, 北京 102600;
2. 天津大学 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要:提出了一种数字影像输出设备色域边界的插值计算方法,并对其精度进行了实验分析。基于 CIELAB 色空间中色域的连通性和三角形插值技术,该方法直接在 CIELAB $L * a * b$ 坐标中进行插值计算,得到有规律变化的色域边界点。对 3 个不同类型的输出设备进行了精度分析,采用 386 个采样点确定色域边界,296 个检验点的色度值与实际输出色度值 CIELAB 色差 ΔE_{ab} 的平均值/最大值分别为 2.31/6.93、2.03/6.70 和 0.40/2.11,接近于各自设备机械稳定性引起的色差。此外,将色域表面映射为色域球,在色域球上进行插值三角形的预查找,使得插值三角形的确定时间由 2.5 min 缩短到 10 s,降低了 15 倍。

关键词:色域;色域边界;色域球;三角形插值

中图分类号:TP334.22;O432.3 **文献标识码:**A

Interpolation method for calculating gamut boundaries of digital imaging output devices

XU Yan-fang^{1,2}, LIU Wen-yao²

1. School of Printing & Packing Engineering, Beijing Institute of Graphic Communication, Beijing 102600, China;
2. Key Laboratory of Opto-electronic Information Technical Science, Tianjin University, the Ministry of Education, Tianjin 300072, China)

Abstract: A interpolation method to define the gamut boundaries of digital imaging devices was presented, and the calculating precision was given experimentally. Based on the connectivity of sample points and the triangular interpolation technique, regularly spaced gamut boundary points were solved directly in the CIELAB $L * a * b$ coordinates. Experiments were carried out with 386 samples for three devices of different types, and the mean/maximum CIELAB ΔE_{ab} for 296 test samples were 2.31/6.93, 2.03/6.70, and 0.40/2.11, respectively, which were close to their corresponding device errors induced by their stability. Besides, by mapping gamut boundary into a gamut sphere and by using a pre-searching process, the interpolation triangle researching time was reduced from 2.5 min to 10 s, decreased 15 times.

Key words: color gamut; gamut boundary; gamut sphere; triangular interpolation

1 引言

数字影像越来越为人们所熟悉,不仅在日常生活中逐渐普及,而且在科学研究中也得到广泛应用^[1-2]。影像质量的优劣取决于获取设备的诸多性能,色域便是彩色数字影像设备的重要性能之一。

色域,指设备可表现的颜色范围,通常由均匀颜色空间 CIELAB 中的有界体积表示。在色彩管理工作流程中,常常需要进行不同色域间的映射,色域的有效确定是一个必需的环节,起着承上启下的桥梁作用。另外,设备的色域大小是设备色彩表现能力的体现。特别地,对硬拷贝输出设备而言,可实现的色域是设备、成色色料和输出材质共同形成的,可通过色域体积等性能分析各因素的成色性能以便进行优化设计。因此,色域的有效确定具有重要的应用价值。

确定色域即在选择的色空间(如 CIELAB)中确定其边界,已有许多不同的方法^[3-6]。本文针对彩色输出设备,给出了一种直接由采样数值确定色域边界的插值方法,在精度和速度上能够满足色域映射和色域分析的要求。

2 色域边界确定方法

2.1 色域边界采样

大多数彩色输出设备可视为 RGB 设备,即设备的驱动程序可直接接受 RGB 数字控制值,或者直接由 RGB 数值控制输出(如使用彩色相纸的彩色激光扩印机),或者以固定的算法将其进行分色,转换为直接控制墨量的 CMYK 数字值打印输出(如常用的桌面彩色打印机)。理论^[7]和实践都表明,RGB 数字立方体的外表面即对应输出色彩 CIE 色度空间中色域的边界。因此,采用组合 RGB 边界值打印输出,测试输出 CIE 色度值的方法采集所需的色域边界样集。相同地,对于驱动程序需要接受 CMY(K)信号的设备,可以组合 CMY 边界值,同样地获得色域边界样集。

2.2 任意色域边界点的求解方法

由于输出色度值与输入 RGB 数值之间为很强的非线性关系,RGB 均匀取值得到的 CIE 色度值在色空间中分布往往很不均匀,不能直接用于

色域映射和色域分析,需要采用一定的方法得到按某种规律分布的色度值。已有方法中,多数要么使用物理模型,要么使用经验方法,由建立的输入输出关系计算出色域边界值。也有极少数方法直接由采样的输出色度值,通过插值的方法构建色域边界。本实验即采用后一种方法,但在具体的插值技术上做了新的尝试。

首先,用于采样的 RGB 数值点,按一定的规律构成三角形网格,如图 1 所示。由于目前为止的大多数输出设备,输出色度值与控制信号间具有平滑的函数关系,输出色度空间对应的点能够形成相同连通性的三角形网格,如图 2 所示。其后,CIEL * a * b * 色域面上的任意点可通过三角形平面插值技术得到,方法如下:

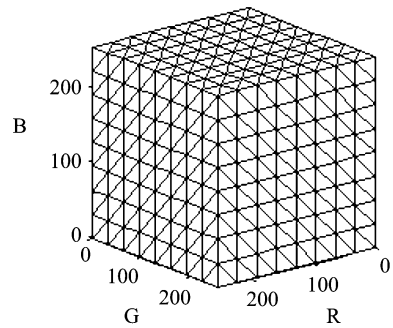


图 1 RGB 边界三角形网格

Fig. 1 RGB boundary triangular grids

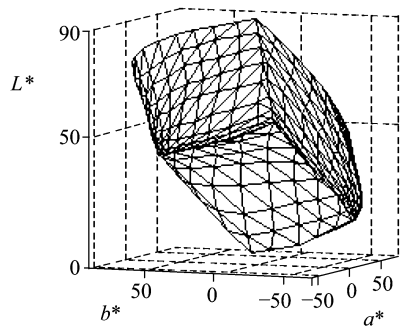


图 2 CIELAB 边界三角形网格

Fig. 2 CIELAB boundary triangular grids

(1)如图 3 所示,选取 CIELAB 色空间明度轴上的中点($L^* = 50, a^* = b^* = 0$)为一固定点 x_0 ,各颜色点的 $L^* a^* b^*$ 值对应一定的 rsh_{ab} 值。这里 r 为色点到 x_0 点的距离, s 为色点与 x_0 点连线与 L^* 轴正方向间的夹角, h_{ab} 为色调角,即:

4°构成的 8190 个色域边界点,如没有上述预查找过程,平均每组 s, h_{ab} 值需查找 204 个三角形平面;而经预查找过程后,则平均每组 s, h_{ab} 值只查找 5 个三角形平面。使用主频为 2 GHz 的微机, MATLAB 语言编程分别耗时约 2.5 min 和 10 s。经预查找过程,查找时间降低 15 倍左右,求解速度变得实际可行。

3 实验结果及分析

实验设计 RGB 等间距、各 9 点取值和各 8 点取值,分别得到 386 和 296 组 RGB 立方体外表面组合值。用 X_Rite DTP22 分光光度仪测试在 D50/2°条件下各输出色块的 CIELAB 色度值 $L * a * b *$ 。选用了 Hp 激光彩色打印机、Hp 宽幅喷墨打印机和使用彩色相纸输出的激光扫描扩印机 3 个输出设备,分别记为 1#、2#、3#。

3.1 色域边界确定精度

由于插值技术不改变采样点数值,所以该方法对原色域边界采样点(包括白点和黑点)没有色差产生。若以 386 个色样为采样点,则具有不同 RGB 数值(白点 $R=G=B=255$ 和黑点 $R=G=B=0$ 除外)的 296 个色样可用于精度分析,反过来也一样。

前者情况,实际输出的 296 组 $L * a * b *$ 值,对应 296 组 s, h_{ab} 值,经上述方法计算出对应的 $L * a * b *$ 值,以计算值和实际输出 $L * a * b *$ 色差 ΔE_{ab} 的平均值与最大值表征该方法可实现的精度,3 个输出设备的实验结果见表 1。表中同时给出了设备重复输出 512 组 RGB 值 2 次对应色块的色差情况,重复输出的色差可认为主要反映设备的稳定性能。

表 1 平均色差 ΔE_{ab} /最大色差 $\Delta E_{ab\max}$

Tab. 1 Mean ΔE_{ab} /maximum $\Delta E_{ab\max}$

Device	386 samples numbers(296 test samples)	296 samples (386 test samples)	repeatability
1#	2.31/6.93	2.33/7.04	2.15/5.78
2#	2.03/6.70	2.08/6.92	1.98/5.90
3#	0.40/2.11	0.40/1.84	0.33/1.03

表中 2、3 栏数据表明,两种情况的拟合精度相差不大,且色差都已接近设备重复输出的色差;

此外,插值拟合的色差与设备的稳定性能相关,设备重复输出色差大,则插值拟合的色差大;设备重复输出色差小,则插值拟合的色差也小。因此可以认为,该实验的色域边界确定方法拟合色差已接近于设备输出不稳定而引起的色差;此外,采用较少的 296 个色域边界采样也具有相近的精度。

3.2 色域映射和色域分析应用

大多数色域映射算法^[9]都需要得到一定色调角 h_{ab} 下的 $L * C_{ab} *$ 色域边界线。给定 h_{ab} 和一系列 s 值,该色域边界确定方法很容易给出对应的多组 $L * a * b *$ 值,转化为 $L * C_{ab} * h_{ab}$ 坐标即得到所需的 $L * C_{ab} *$ 线。实验的 1# 设备几个色调角对应的 $L * C_{ab} *$ 线如图 4 所示,各 $L * C_{ab} *$ 线较为光滑连续,可直接用于色域算法及算法研究中。

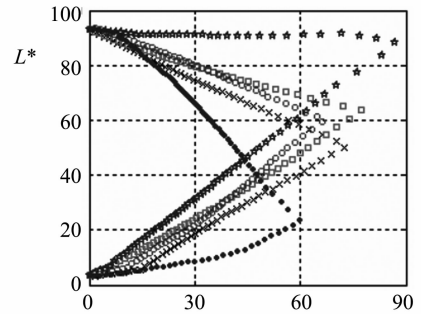


图 4 对应不同色调角 h_{ab} 的 $L * C_{ab} *$ 线

Fig. 4 $L * C_{ab} *$ lines corresponding to difference h_{ab}

由于该方法可方便地对 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 之间的 s 和 $0 \sim 360^\circ$ 之间的 h_{ab} 均匀取样确定色域边界 $L * a * b *$ 值,可由其 $C_{ab} *$ 值的累加表征色域体积;还可以方便地从这样得到的 $C_{ab} *$ 值中确定色域的青、品红、黄、红、绿、蓝最大彩度色坐标。这些性能可用于设备各因素不同组合情况和不同设备间的色域分析和比较。

3.3 该方法的优势

实验表明,该方法具有下述优势:

(1) 插值计算有保证,得到的色域边界面较为平滑。实验表明,该方法对任意的 s, h_{ab} 值均能计算出正确的 r 值,没有文献[4]中所说明有时会因计算问题不能求出插值结果的情况;另外,由于 CIELAB 色空间中色域为变形的六面体,每个面近似为平面^[4],该方法直接在 $L * a * b *$ 坐标中进行平面插值,避免了文献[6]中采用在 $L * h_{ab}$ 平面上插值变换回 $L * a * b *$ 坐标中时引起的局

部凸起现象,因而色域边界不必进行格外的平滑处理即较为光滑。

(2) 准确地保持了色域白点和黑点的特征

由于该插值方法只涉及色域采样点的 $L * a * b$ 坐标值,对其 sh_{ab} 值没有任何限制,能够准确地再现包括白点和黑点的所有色域采样点特征。所以,一方面不必像文献[6]中所用方法对白点和黑点做须在灰度轴上的假定,另一方面也没有许多由模型方法计算色域边界 $L * a * b$ 值时对白点和黑点数值产生的偏离,能够保持白点和黑点的色度特征,这在色域映射和色域分析中都更具实用价值。

(3) 具有较高的精度和可实用的计算速度

表1的色差结果表明,该方法具有较高的色域边界确定精度;预查找过程提高了求解速度,在当今的微机条件下,能够实际应用。

(4) 具有广泛适用性

由于该方法与设备的色彩模型没有关系,所

以具有广泛的适用性。实验也表明,对不同类型的设备,都能得到较高精度的稳定结果,而实现精度的差异主要来自设备系统的机械稳定性。

4 结 论

采用由采样数据直接在 CIE $L * a * b$ 坐标空间中进行三角形插值计算的方法,可构建有规律变化的色域边界点,且不需设备的色彩转换模型;色域边界点的确定精度与设备性能相关,接近设备机械稳定性所引起的色差。此外,该方法可保持采样白点和黑点的色度特征,以保证色彩变换应用的准确性;所形成的色域边界面平滑、连续,可通过坐标转换方便地用于色域映射和色域分析中。

在插值三角形的查找中,通过引入色域球和进行预查找,降低了插值三角形的确定时间,使得该方法的整体求解速度实际可行。

参考文献:

- [1] 张少军. 利用数字图象处理技术测量直齿圆柱齿轮集合尺寸[J]. 光学精密工程, 2004, 12(6): 619-625.
ZHANG SH J. Digital image processing technology for spur gear measurement[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004, 12(6): 619-625. (in Chinese)
- [2] 罗诗途,王艳玲,罗飞路. 车载图像跟踪系统中电子稳像算法的研究[J]. 光学精密工程, 2005, 13(1): 95-103.
LUO SH T, WANG Y L, LUO F L. Electronic image stabilizing algorithm for image tracking system on vehicle [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005, 13(1): 95-103. (in Chinese)
- [3] BAUMANA E, HOFMANN R, SCHAER M. Print performance evaluation of ink jet media: gamut and dye diffusion[J]. *Journal of Imaging Science and Technology*, 2000, 44(6): 500-507.
- [4] MORORIC J, LUO M R. Calculating medium and image gamut boundaries for gamut mapping[J]. *Color Research and Application*, 2000, 25(6): 394-401.
- [5] 胡太银,曾平. 打印机色域可视化[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2002, 14(2): 1164-1166.
HU T Y, ZENG P. Printer's gamut visualization based on geometric model[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2002, 14(2): 1164-1166. (in Chinese)
- [6] BRAAUN G J, FAIRCHILD M D. Techniques for gamut surface definition and visualization[C]. *Proceedings 5th IS&T/SID Imaging Conference*, 1997: 147-152.
- [7] MAHY M. Calculation of color gamuts based on the Neugebauer model[J]. *Color Research and Application*, 1997, 22(6): 365-374.
- [8] HUNG P CH. Colorimetric calibration in electronic imaging devices using a look-up-table model and interpolations [J]. *Journal of Electronic Imaging*, 1993, 2(1): 53-61.
- [9] 黄庆梅,赵达尊. 基于 Zernike 多项式表示色域边界的色域映射[J]. 光学技术, 2003, 29(2): 168-171.
HUANG Q M, ZHAO D Z. Gamut mapping based on gamut boundaries expressed with Zernike polynomials[J]. *Optical Technique*, 2003, 29(2): 168-171. (in Chinese)