

基于球坐标及三角形插值的 颜色信号色域映射算法

叶 程¹, 刘 真¹, 吴明光²

(1. 上海理工大学出版印刷与艺术设计学院, 上海 200093; 2. 南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室, 江苏南京 200046)

摘 要: 针对颜色信号在进行跨媒体传输时出现的失真问题, 提出一种基于球坐标及三角形插值的色域映射算法. 首先, 在球坐标系内选取目标色域的边界颜色点以作为三角形插值的节点; 其次, 通过插值节点预查找方法选取 3 个符合插值要求的最优节点; 最后, 使用三角形插值计算得到待映射颜色信号对应的目标色域边界. 在 EPSON 及 HP 打印机上的实验结果表明本文算法具有良好的可靠性、计算精度及执行效率, 可广泛应用于各类呈色设备及彩色图像的色域映射中.

关键词: 跨媒体; 色彩管理; 色域映射; 打印机; CIELAB 颜色空间

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2015)11-2180-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2015.11.007

Gamut Mapping Algorithm for Color Signal Based on Spherical Coordinates and Triangular Interpolation

YE Cheng¹, LIU Zhen¹, WU Ming-guang²

(1. College of Communication and Art Design, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. Key Laboratory of Virtual Geographic Environment, Nanjing Normal University, Nanjing, Jiangsu 200046, China)

Abstract: In order to solve the distortion problem of color signal in cross media reproduction process, a gamut mapping algorithm based on spherical coordinates and triangular interpolation was proposed. Firstly, the algorithm chooses the boundary color samples of target gamut as the triangular interpolation nodes. Secondly, three optimal interpolation nodes are selected through a pre-search process. Finally, the algorithm calculates the correspondent gamut boundary point of the mapping color by triangular interpolation. The experimental results demonstrate that the algorithm has good calculation precision and efficiency, and can be used in the color mapping process of different color devices and images.

Key words: cross media; color management; gamut mapping; printer; CIELAB color space

1 引言

颜色信号在进行跨媒体传输时, 由于不同颜色复制设备间呈色机理及所属颜色空间的不同容易造成颜色的失真与丢失, 为此需要进行色域映射以实现颜色信号在不同设备间传输时的良好再现^[1,2]. 色域映射的目的是要在颜色信号正确可视化的前提下实现不同颜色空间的匹配, 其实施的前提则是待映射颜色所对应目标色域边界的准确提取与描述^[3,4]. 目前主流的色域映射方法大多是首先在目标设备的全色域范围内采样得到若干个位于色域最外围的边界颜色点, 对目标色域做总体上的描述, 并在此基础上通过插值、拟合等方式求得具

体待映射颜色信号对应的目标色域边界, 从而将待映射颜色复制到目标设备色域内^[5]. 文献[6]提出了一种基于改进凸壳算法的色域映射方法, 该方法首先在目标色域内进行采样, 然后使用凸壳算法提取出位于色域最外围的边界颜色点, 但由于该算法往往将部分色域内部颜色点错判为色域边界点, 计算出的色域边界与实际边界存在一定的偏差^[6]. 文献[7]提出的分区最大边界描述法, 将色域边界的描述分为色域边界描述器的计算与线性色域边界的计算两步, 但该方法在实施过程中需要对数据进行两次插值, 且在求解线性色域边界时还需要对插值得到的线性色域边界点再进行一次拟合, 过多的插值与拟合计算影响了色域边界描述的准确度及算法的执行效

率^[7].文献[8]中公开了一种色域映射的设备和方法,然而此方法仍然需要在目标色域不存在颜色采样点的区域中进行内插计算以得到相应的虚拟色域边界点,并且在色域映射的过程中仍然存在插值与拟合计算过多的问题^[8].已有算法与经验表明,为获得良好的颜色传输效果,色域映射过程中目标色域最外围边界颜色采样不准与插值拟合计算精度低且过于复杂是必须要解决的两个关键问题.

球坐标系是三维空间坐标系的一种,它以坐标原点为参考点,由距离 γ 、色相角 α 和方位角 θ 构成,能够方便、准确的描述出颜色信号在特定色空间中的位置,并且通过简单的转换关系便能与通用的中转色空间(如 CIELAB、CIELUV 等)建立联系^[9].三角形插值是一种常用的三维空间插值技术,它可根据三维空间中三角形顶点的坐标值与空间直线的方向向量判断空间三角形与直线是否相交于一点,并在相交的情况下通过简单的矩阵计算得到相应的交点坐标,计算精度高且插值过程简单^[10].本文充分利用二者的上述优点,提出一种基于球坐标系及三角形插值的色域映射算法,以解决映射过程中目标色域边界颜色采样不准以及插值计算精度低且过于复杂的问题,并可被广泛应用于各类呈色设备及彩色图像颜色信号的跨媒体复制中.

2 色域映射算法的构建

2.1 三角形插值节点颜色的获取

CIELAB 颜色空间是一种独立于各类呈色设备且具有良好视觉均匀性的颜色系统,也是色域映射中常用的中转连接色空间(PCS).本文算法首先将色域映射中的目标色域(图像或设备色域)转换到 CIELAB 颜色空间,然后在目标色域的全范围内等间隔均匀的进行颜色采样,并计算采样所得颜色样本对应的球坐标值,计算方法如式(1)所示:

$$\begin{cases} \gamma = [(L - L_E)^2 + (a - a_E)^2 + (b - b_E)^2]^{1/2} \\ \alpha = \tan^{-1}[(b - b_E)/(a - a_E)] \\ \theta = \tan^{-1}\{(L - L_E)/[(a - a_E)^2 + (b - b_E)^2]^{1/2}\} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中, (L, a, b) 是颜色样本点的 CIELAB 颜色值, L_E, a_E, b_E 为球坐标系原点 E 处的 CIELAB 颜色值,如图 1(a)所示,本文选取 CIELAB 空间的亮度轴中点 E (即 $L = 50, a = b = 0$)作为球坐标系的原点, (γ, α, θ) 为采样颜色对应的球坐标值,其中 γ 表示颜色点到原点的距离, α 表示颜色在 CIELAB 空间中的色相角,范围为 $0 \sim 360^\circ$, θ 是色相角为 α 时的方位角,范围为 $-90 \sim 90^\circ$.

如图 1(b)所示,通过对球坐标系中 α, θ 角进行均匀划分的方法将 CIELAB 色空间分割成若干个小分区,并从计算好球坐标值的颜色样本集中选取出位于各分

区最外围的边界颜色点(文献[7]将其称为 gamut boundary descriptor,本文使用缩写 GBD 进行表示),选取出 GBD 点的 α, θ 值应在各分区的 α, θ 值范围内,且在该分区内具有最大的 γ 值,并将这些 GBD 点作为三角形插值的节点颜色数据.此外,由于受到所采集颜色样本数量的限制,目标色域内存在一部分不含颜色样本的色域分区,不同于已有算法,本文算法不需要通过插值计算来获得这些分区的虚拟 GBD 节点,以避免引入不必要的误差.

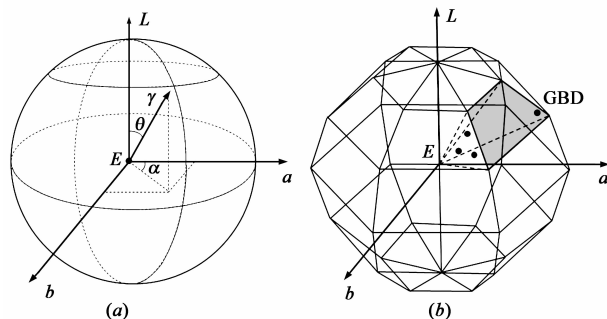


图1 三维空间球坐标系示意图

2.2 待映射颜色对应目标色域边界的计算

通过 2.1 中的分析可知,经球坐标法选取所得的 GBD 颜色节点均为目标色域在特定分区内的真实边界点,相应的,由其中任意 3 个相邻 GBD 节点所构成的空间三角形面元便可用于表示目标色域在 CIELAB 颜色空间中的外表面,因此当待映射颜色点与目标色域内部固定锚点(一般为亮度轴中点)间的连线与由 GBD 节点所构成的某个三角形面元相交于一点时,该交点便为待映射颜色点对应的目标色域边界,此时可通过三角形插值的方法获取该交点相应的颜色坐标.

图 2 所示为使用 2.1 中所得 GBD 颜色节点在 CIELAB 颜色空间内构造插值三角形的示意图,图中 P 点表示待映射的彩色颜色信号,其相应的 CIELAB 颜色值与球坐标值分别为 (L_p, a_p, b_p) 和 $(\gamma_p, \alpha_p, \theta_p)$, E 点为亮度轴上的固定锚点, Triangle1 为由 3 个特殊相邻节点 GBD_1, GBD_2, GBD_3 所构成的三角形面元, P' 点为根据三角形插值的计算要求而在目标色域内构造出的虚拟颜色点,其球坐标值为 $(\gamma_{min}/2, \alpha_p, \theta_p)$, 其中 γ_{min} 为节点 GBD_{1-3} 中所含的最小球坐标 γ 值, P^* 为 Triangle1 面元与连线 PE 的交点,也即 P 点对应的目标色域边界,则可通过如下三角形插值过程获得交点 P^* 对应的 CIELAB 颜色坐标:

$$\begin{bmatrix} L^* \\ a^* \\ b^* \end{bmatrix} = \eta \begin{bmatrix} L_E - L'_P \\ a_E - a'_P \\ b_E - b'_P \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L'_P \\ a'_P \\ b'_P \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中,

$$\eta = \frac{1 - [i \ j \ k] \times \begin{bmatrix} L'_P \\ a'_P \\ b'_P \end{bmatrix}}{\delta} \quad (3)$$

$$\delta = [i \ j \ k] \times \begin{bmatrix} L_E - L'_P \\ a_E - a'_P \\ b_E - b'_P \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$[i \ j \ k] = [1 \ 1 \ 1] \times \begin{bmatrix} L_1 & L_2 & L_3 \\ a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \end{bmatrix}^{-1} \quad (5)$$

式(2)~(5)中, (L^*, a^*, b^*) 为最终所求 P^* 点的 CIELAB 颜色值, (L_E, a_E, b_E) 为锚点 E 的 CIELAB 颜色坐标, (L_1, a_1, b_1) 、 (L_2, a_2, b_2) 、 (L_3, a_3, b_3) 分别为节点 GBD_{1-3} 的 CIELAB 颜色值, (L'_P, a'_P, b'_P) 为 P' 点的 CIELAB 颜色值, 其可通过球坐标值 $(\gamma_{\min}/2, \alpha_P, \theta_P)$ 经(1)所示的逆过程而得。

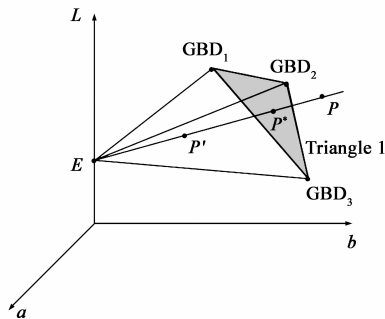


图2 三角形插值过程示意图

因此算法的关键便是要从已知的 GBD 节点集合中选取图 2 所示的 3 个相邻 GBD 节点, 以确定符合 P 点插值要求的三角形面元, 并且所选取出的 GBD 节点应尽可能的靠近颜色 P 以保证能够得到良好的插值精度. 然而 GBD 集合中的颜色数量通常较多, 此时若直接从众多 GBD 点中进行最终插值节点的查找将是非常耗时的, 且无法保证能够选取所需的最优插值节点. 为此, 本文通过以待映射颜色 P 为中心将 GBD 节点集均匀划分为 4 个子集的预查找方法来快速准确的获得所需的最优插值节点.

如图 3 所示为将图 1(b) 中所有 GBD 节点展开到二维平面后的子集划分示意图, 图中 P 点表示三维空间中任意的待映射颜色, 子集 A_1 、 A_2 、 B_1 、 B_2 为以 P 点为中心而均匀划分出的 4 个 GBD 点子集, $GBD_1 \sim 4$ 分别表示各子集内与 P 点最接近的插值节点. 由空间几何关系可知, 由插值节点 $GBD_1 \sim 4$ 所组合成的 4 个空间三角形中, 至少有一个与连线 PE 相交于一点.

为了实现图 3 所示 GBD 节点集合的均匀划分, 如图 4(a) 所示, 预查找方法首先使用过直线 PE 与 L 轴

的 ψ 平面将 GBD 节点集合均匀划分为两个大子集 A 、 B , 为了方便的对于位于大子集 A 、 B 内的 GBD 节点进行区分, 预查找方法以 P 点以及各 GBD 节点的球坐标色相角 α_P 、 α 为基准, 使用式(6)计算各 GBD 节点的索引角 α' :

$$\begin{cases} \alpha' = \alpha - \alpha_P, & \text{若 } \alpha \geq \alpha_P \\ \alpha' = 360^\circ - (\alpha_P - \alpha), & \text{若 } \alpha < \alpha_P \end{cases} \quad (6)$$

则经式(6)计算后, 图 4(a) 中所有位于 ψ 平面射线 PE 方向右侧 GBD 节点(子集 A)的 α' 索引角被调整到了 $0 \sim 180^\circ$ 之内, 而所有位于射线 PE 方向左侧 GBD 节点(子集 B)的 α' 索引角则在 $180 \sim 360^\circ$ 之间, 此时 CIELAB 颜色空间亦被 ψ 平面分割成了两个相等的半球.

预查找方法接着使用过直线 PE 且垂直于 ψ 面的空间平面将图 4(a) 中的两个相等半球继续均匀划分为 4 个以 PE 为轴的相等四分之一半球, 同时将大子集 A 、 B 内的 GBD 节点均匀划分为子集 A_1 、 A_2 和 B_1 、 B_2 共 4 个子集. 与此对应的, 预查找方法通过计算 GBD 节点索引角 β' 的方法来对于不同小子集内的 GBD 节点进行区分, 索引角 β' 的计算方法如下:

如图 4(b) 所示, 将 GBD 插值节点在 ψ 平面上对应的垂直投影点记为 GBD' , 其相应的 CIELAB 颜色值记为 (L', a', b') , 将 ψ 平面内以 E 为原点、彩度 C 为横坐标、明度轴 L 为纵坐标的直角坐标系(记为 C - L 坐标系), 并使用式(7)、(8)计算 GBD 节点在 C - L 坐标系内的方向角 β , 计算方法如下:

$$\beta = \tan^{-1}[(L' - L_E)/C] \quad (7)$$

其中,

$$\begin{cases} C = (a'^2 + b'^2)^{1/2}, & \text{若 } GBD' \text{ 点位于 } L \text{ 轴右侧} \\ C = -(a'^2 + b'^2)^{1/2}, & \text{若 } GBD' \text{ 点位于 } L \text{ 轴左侧} \end{cases} \quad (8)$$

同样的, 根据式(7)、(8)计算待映射 P 点的 ψ 面方向角 β_P , 并以 P 点以及各 GBD 节点的方向角 β_P 、 β 为基准, 使用式(9)计算各 GBD 节点的索引角 β' :

$$\begin{cases} \beta' = \beta - \beta_P, & \text{若 } \beta \geq \beta_P \\ \beta' = 360^\circ - (\beta_P - \beta), & \text{若 } \beta < \beta_P \end{cases} \quad (9)$$

则经式(9)计算后, 图 4(b) 中所有位于子集 A_1 、 B_1 内 GBD 节点的 β' 索引角被调整到了 $0 \sim 180^\circ$, 而位于子集 A_2 、 B_2 内 GBD 节点的 β' 索引角则在 $180 \sim 360^\circ$ 之间. 此时便可综合式(6)、(9)计算所得的 α' 、 β' 索引角值, 将 GBD 节点集合均匀划分为图 3 所示的 4 个子集. 依次在划分出的 4 个子集内计算 GBD 节点球坐标值 α 、 θ 与 P 点球坐标值 α_P 、 θ_P 间的绝对值差 $|\Delta\alpha|$ 和 $|\Delta\theta|$, 并分别在各子集中选取得到 1 个具有最小 $(|\Delta\alpha| + |\Delta\theta|)/2$ 值的特殊 GBD 点(即图 3 中 $GBD_1 \sim 4$).

因此经预查找后, 算法只需从上述 4 个 GBD 点中进行最终插值节点的选取, 节点的查找次数被成功的

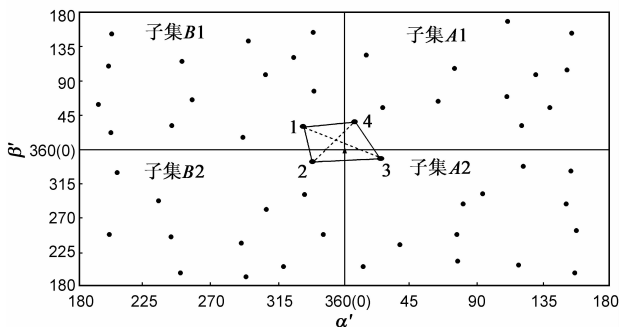


图3 以P点为中心的GBD点子集划分示意图

限制在了 4 次以内,有效的提高了算法的执行效率,并且由于选取出的插值节点均为各子集内最接近待映射颜色 P 的真实颜色点,算法因而具有良好的计算精度.判断所选插值点是否符合三角形插值要求的方法如式(10)所示:

$$\begin{bmatrix} \lambda \\ \mu \\ \nu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 - L_E & L_2 - L_E & L_3 - L_E \\ a_1 - a_E & a_2 - a_E & a_3 - a_E \\ b_1 - b_E & b_2 - b_E & b_3 - b_E \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} L'_P - L_E \\ a'_P - a_E \\ b'_P - b_E \end{bmatrix} \quad (10)$$

式(10)中, $L_1, a_1, b_1, L_2, a_2, b_2, L_3, a_3, b_3$ 分别表示 3 个参与判断 GBD 点的 CIELAB 颜色值, L'_P, a'_P, b'_P 为图 2 所构建 P' 点的 CIELAB 颜色值, L_E, a_E, b_E 为原点 E 的 CIELAB 颜色值, λ, μ, ν 为相应的判断系数,当 $\lambda \geq 0, \mu \geq 0, \nu \geq 0$, 且 $\lambda + \mu + \nu \leq 1$ 时,所选取的 3 个 GBD 点即为三角形插值所需的最优插值点,此时可通过式(2)~(5)所示计算得到 P 点对应的目标色域边界.

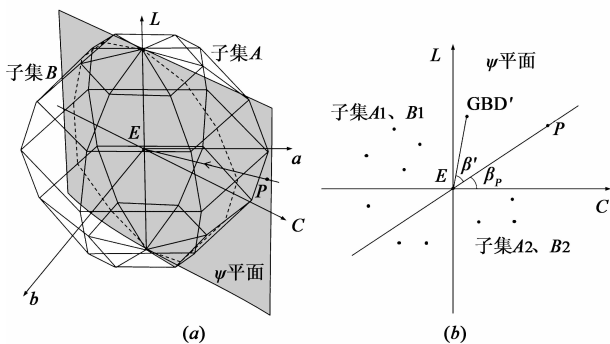


图4 三角形插值点预查找过程示意图

3 实验结果及分析

设计实验对本文算法的可靠性、计算精度进行分析.算法可靠性即算法在判断颜色信号与目标色域间位置关系结果(位于目标色域内或外)与主流色彩管理软件判断结果的符合率,由于色域映射算法通常采取不同的映射方案来分别处理位于目标色域内、外的颜色信号,因此具备良好可靠性是对色域映射算法的基

本要求.计算精度表示算法计算所得目标色域边界与真实边界之间的接近程度,实验通过打比较打印机边界颜色真实输出值与插值计算值之间的 CIELAB 色差来对算法的计算精度进行评价.

3.1 算法可靠性分析

使用 EFI Colorproof XF 色彩管理软件对 EPSON Stylus Pro 7910 彩色喷墨打印机进行特性化校正并获得相应的 ICC 特性文件.所得打印机 ICC 文件内部“gummatag”标签中内嵌的查找表可用于判断特定颜色信号与打印机色域间的位置关系,当“gummatag”标签输出结果为 0 时,表示颜色信号位于设备色域之内,反之当输出结果不为 0 时,位于设备色域之外^[11].同样使用本文算法判断颜色采样点与打印机色域的位置关系,如图 2 所示,当颜色采样点与 E 点连线 PE 的长度大于边界点与 E 点连线 P'E 的长度时表示颜色采样点位于打印机色域外,反之则在色域内.

本文以“gummatag”标签的输出结果为标准来对本文算法的可靠性进行评价.首先在 CIELAB 全色域范围内以 5 为间隔分别对 L 值从 0~100, a 值、b 值从 -128~127 的范围内进行采样,共采样得到 56784 个颜色样本.使用“gummatag”标签的判断结果表明采样所得颜色样本中有 37952 个位于打印机色域内(记为颜色集 S1),18832 个位于打印机色域外(记为颜色集 S2).接着按照论文第 2.1 节中所述的方法,先后对球坐标 α 和 θ 值进行 20 及 25 等分,从而将打印机色域分割为 400 及 625 个分区,并在这两种分区情况下从色域内颜色集 S1 中分别选取得到 366 和 550 个 GBD 颜色点.所得两组 GBD 点均为各自分区下的目标色域边界点,实验将其作为本文算法的三角形插值节点.

根据所得的两组 GBD 节点集,在 400 及 625 分区情况下分别使用本文算法及 CIE 推荐的 SMGBD 算法求解颜色集 S1、S2 中颜色样本对应的打印机色域边界,从而判断颜色样本与打印机色域间的位置关系,判断结果如表 1 所示:

表 1 两种算法判断颜色信号与目标色域间位置关系时的可靠性

	分区数	颜色集	颜色集	颜色集	颜色集	可靠性
		S1 中色域内颜色数	S1 中色域外颜色数	S2 中色域内颜色数	S2 中色域外颜色数	
本文算法	400	34941	3011	21	18811	94.7%
	625	35582	2070	2	18830	95.8%
SMGBD	400	34775	3177	77	18755	94.2%
	625	32261	5691	126	18706	89.8%

从表 1 可以看出,本文算法在使用 366 及 550 个 GBD 节点插值时的可靠性均在 94.7% 以上,优于同分区情况下 SMGBD 算法的计算效果,数据表明本文算法

只需使用较少的插值样本便可基本达到 EFI 色彩管理软件的准确性水平,具有很高的可靠性.且通过分析发现,随着 GBD 节点数量的增加,本文算法插值的可靠性有所提升,而 SMGBD 算法在 625 分区下的可靠性较 400 分区却有所下降,这是由于 SMGBD 算法在高分区情况下需要插值获取更多的虚拟边界节点以用于拟合待映射颜色对应的线色域边界,这种二次误差的叠加会对算法的准确性产生较大的影响,而本文算法在颜色分区数增加时,相应的具有了分布更为密集的 GBD 插值节点集,且这些插值节点均为目标色域内的真实颜色,因而计算结果也更为可靠.

3.2 算法计算精度分析

不同于 RGB 色空间中色域边界获取过程的方便与快捷,打印机 CMYK 色空间的色域边界很难通过采样获得^[12],为此本文通过将打印机色域划分为不同分区的方法来获得相应的边界颜色点,并用于检测本文算法的计算精度.首先根据颜色分区理论分别在 CMYK 色空间的 CMK、MYK、CYK 及 CMY 分区的各信号通道上以 10 为步长在网点面积率 0~100 的范围内等间隔采样,在打印机全色域范围内得到 5324 个颜色采样点,使用 EFI Colorproof XF 色彩管理软件控制校正后的 EPSON Stylus Pro 7910 及 HP Design-jet Z3200 这两款不同的喷墨打印机对采样得到的颜色信号进行四色输出,并使用 Eye-one Pro 分光光度计测量输出后的 CIELAB 颜色值.

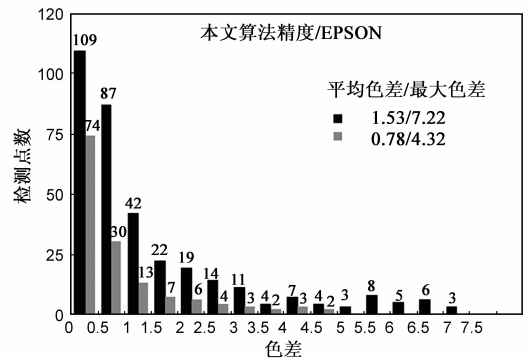
按照 2.1 中所述分别将 CIELAB 颜色空间均匀划分为 400 和 625 个分区,并在使用 EPSON 及 HP 打印机输出后的颜色采样点中进行 GBD 插值节点颜色的选取,两款打印机在这两种分区情况下所得 GBD 点颜色数如表 2 所示:

表 2 两种分区情况下所得打印机 GBD 点颜色数

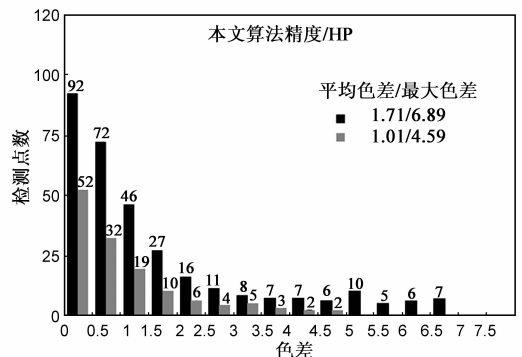
设备	400 分区	625 分区	重合 GBD 点个数
EPSON	382(144)	582(344)	238
HP	367(135)	552(320)	232

表中第 2、3 两列数据分别为两款打印机在 400 及 625 分区下所得的 GBD 点颜色数,第 4 列数据为打印机两组 GBD 节点间重合的颜色数,括号内的数据则为各分区剩余不重合的 GBD 点颜色数.实验先后以 400、625 分区下的 GBD 点为插值节点,以 625、400 分区剩余不重合的 GBD 点为打印机色域边界检测点,分别使用本文算法及 CIE 推荐的 SMGBD 算法计算边界检测点对应的插值颜色值,通过比较两种算法所得插值颜色值与实际输出值之间的 CIELAB 色差来分析本文算法的计算精度.为了排除由于打印机输出的不稳定性对计算结果造成的影响,本文使用 EPSON 和 HP 打印机对上述两种精度检测点和候选插值点组合进行了多次输出,并使用多次计算结果的平均值为度量来对算法的精度进行评价,在

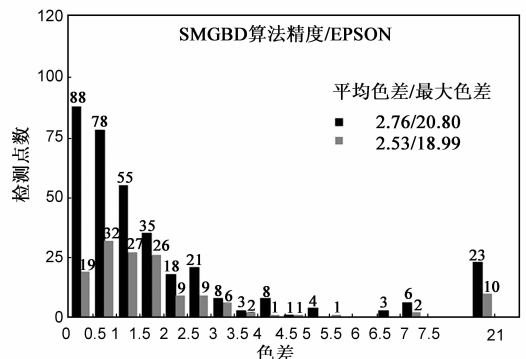
EPSON 及 HP 打印机上的精度分析结果如图 5 所示:



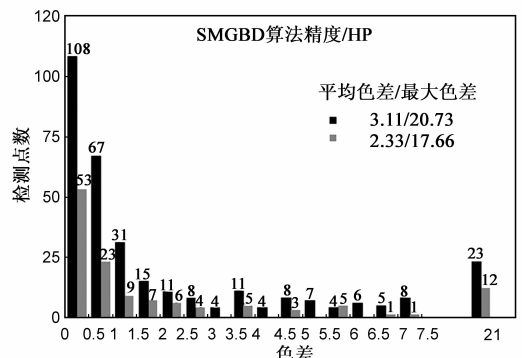
(a) 本文算法在 EPSON 打印机上的色差分布结果



(b) 本文算法在 HP 打印机上的色差分布结果



(c) SMGBD 算法在 EPSON 打印机上的色差分布结果



(d) SMGBD 算法在 HP 打印机上色差分布结果

图 5 本文算法与 SMGBD 算法的计算精度分析结果

图中所示分别为使用本文算法与 SMGBD 算法计算所得两款打印机边界检测点插值颜色值与实际输出值之间 CIELAB 色差的分布直方图,图中横坐标表示 0~7.5 色差范围内以 0.5 为间隔而划分出的 15 个色差区间,纵坐标则表示落在各色差区间内的检测点个数,其中深色数据组表示以 400 分区下 GBD 点为插值节点、625 分区下剩余不重合 GBD 点为检测点时的色差分布,浅色数据组则为以 625 分区下 GBD 点为插值节点、400 分区下剩余不重合 GBD 点为检测点时的色差数据.通过对比图 5(a)、(c)与图 5(b)、(d)中的色差数据可知,相比于经典的 SMGBD 算法,本文算法计算所得检测点颜色值与实际输出值间的平均色差精度和最大色差精度分别提升了 2 倍和 3.4 倍,具有良好的计算精度.同时 5(a)、(b)中的数据 displays,本文算法在两款打印机的 GBD 节点数量由 382、367 个增加到 582 和 552 个时,所得检测点的平均色差精度及最大色差值精度均有较大的提升,而图 5(c)、(d)中 SMGBD 算法在 GBD 节点数增加时所得的色差精度却未得到明显改善,这是由于 SMGBD 算法在目标色域分区数增加时需要插值获取更多的虚拟边界节点,这些增加的误差抵消了由于插值点数量增加而带来的精度提升,而本文算法则不存在这种偏差.

此外,在主频为 2.5GHz 的微机上使用 Matlab 软件对本文算法求解 EPSON 及 HP 打印机中 488 和 455 个检测点对应目标色域边界的计算时间进行统计,并与 SMGBD 算法的计算耗时进行比较,结果如表 3 所示:

表 3 EPSON 及 HP 打印机上的算法执行效率分析结果

设备	本文算法耗时 (s)	SMGBD 算法 耗时(s)	插值三角形 查找次数
EPSON	4.13	3.96	1.85
HP	3.82	3.71	1.71

从表 3 中第 2、3 列数据可以看出本文算法与 SMGBD 算法的计算耗时基本相同,表明本文算法在获得良好的准确性与计算精度时并不需要增加额外的时间成本.第 4 列数据为使用 2.2 中所述的插值点预查找方法后插值三角形的平均查找次数,在采用预查找方法后算法只需从 EPSON 及 HP 打印机候选插值点的 19250136 和 15596035 种插值三角形组合中分别进行 1.85 和 1.71 次查找便可得到符合条件的三角形插值点,平均查找次数为 1.78 次,预查找过程极大的提高了本文算法的计算效率.

4 结论

本文提出的彩色颜色信号色域映射算法充分利用了球坐标系及三角形插值的优点,并成功解决了色域

映射过程中目标色域最外围边界颜色采样不准及插值拟合计算精度低且过于复杂的问题.实验结果表明本文算法在判断颜色信号与待描述色域间位置关系时的准确率达到了主流色彩管理软件的水平,相比于 CIE 推荐的经典 SMGBD 算法,本文算法在求解颜色信号对应目标色域边界时的平均色差和最大色差精度分别提升了 2 倍和 3.4 倍,经预查找处理后,两款打印机所选检测点的插值三角形平均查找次数为 1.78 次.分析表明本文算法具有良好的准确性、计算精度及执行效率,并可广泛应用于各类颜色复制设备及彩色图像的色域映射中.

参考文献

- [1] 罗雪梅,曾平,王莹,王义峰.基于色调恒常空间的色彩管理[J].电子学报,2010,38(11):2660-2663.
Luo Xue-mei, Zeng Ping, Wang Ying, Wang Yi-feng. Color management using a hue-constancy color space[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(11): 2660-2663. (in Chinese)
- [2] 卫保国,沈兰荪,蔡轶珩.虚拟标准显色设备——跨网络色彩重现的新方案[J].电子学报,2003,31(12):1828-1831.
Wei Bao-guo, Shen Lan-suan, Cai Yi-heng. Virtual standard color device: A new solution to cross-network color reproduction[J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(12): 1828-1831. (in Chinese)
- [3] 刘真,崔虎平.地图电子出版系统颜色空间转换模型的研究[J].测绘学报,2000,29(4):342-347.
Liu Zhen, Cui Huping. Research on color space transform model in map electronic publishing system[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2000, 29(4): 342-347. (in Chinese)
- [4] 吴明光.跨媒介的地图色域映射方法研究[J].测绘学报,2012,41(2):291-297.
Wu Ming-guang. Cross media map gamut mapping method[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2012, 41(2): 291-297. (in Chinese)
- [5] Bakke A M, Farup I, Hardeberg J Y. Evaluation of algorithms for the determination of color gamut boundaries[J]. Journal of Imaging Science and Technology, 2010, 54(5): 50502-1-11.
- [6] Raja Balasubramanian, Edul Dalal. A method for quantifying the color gamut of an output device[A]. Color Imaging: Device-independent Color, Color Hard Copy, and Graphic Arts, Volume 3018 of SPIE[C]. San Jose, CA, USA: ACM, 1997. 110-116.
- [7] Morovic J, Luo M R. Calculating medium and image gamut boundaries for gamut mapping[J]. Color Research and Application, 2000, 25(6): 394-401.
- [8] 三星电子株式会社.检测色域边界及使用其来映射色域

- 的设备和方法[P].中国专利,CN1753452A,2004-9-21.
Samsung Electronics Co Ltd. Apparatus for Detecting Color Gamut Boundary and Apparatus for Mapping Using the Same and Method Thereof [P]. Chinese Invention Patent, CN1753452A,2004-9-21. (in Chinese)
- [9] F L Teixeira, W C Chew. Systematic derivation of anisotropic PML absorbing media in cylindrical and spherical coordinates [J]. IEEE Microwave and Guided Wave Letters, 1997, 7(11): 371 - 373.
- [10] Hung Po-chieh. Colorimetric calibration in electronic imaging devices using a look-up-table model and interpolations [J]. Journal of Electronic Imaging, 1993, 2(1): 53 - 61.
- [11] 廖宁放, 石俊生, 吴文敏. 数字图文图像颜色管理系统概论[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2009. 249 - 252.
Liao Ning-fang, Shi Jun-sheng, Wu Wen-ming. An Introduction to Digital Color Management System [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2009. 249 - 252. (in Chinese)
- [12] 朱明, 刘真, 陈广学. 基于分区纽阶堡方程的 6 色印刷分色模型研究[J]. 光学学报, 2011, 31(7): 1 - 10.
Zhu Ming, Liu Zhen, Chen Guang-xue. Research on six-color separation model based on subarea neugebauer equations [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(7): 1 - 10. (in Chinese)
- [13] 刘瑞华, 曾平, 王义峰. 一种自适应分区回归的打印机色彩校正方法[J]. 电子学报, 2007, 35(11): 2201 - 2204.
Liu Rui-hua, Zeng Ping, Wang Yi-feng. A color calibration method of printer using adaptive regression [J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(11): 2201 - 2204. (in Chinese)
- [14] 王义峰, 曾平. 基于色域划分的多通道打印机色彩校正 [J]. 电子学报, 2010, 38(3): 507 - 511.
Wang Yi-feng, Zeng Ping. Multi-channel printer characterization based on gamut partition [J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(3): 507 - 511. (in Chinese)
- [15] 徐艳芳, 刘文耀. 数字影像输出设备色域边界的插值计算方法[J]. 光学精密工程, 2006, 14(2): 261 - 265.
Xu Yan-feng, Liu Wen-yao. Interpolation method for calculating gamut boundaries of digital imaging output devices [J]. Optics and Precision Engineering, 2006, 14(2): 261 - 265. (in Chinese)

作者简介



叶程男, 1991 年 1 月出生, 福建南平人. 上海理工大学硕士研究生, 主要研究方向为色彩管理、颜色科学和图像处理.

E-mail: printyecheng@163.com



刘真女, 1953 年 1 月出生, 江苏泰州人. 上海理工大学教授, 博士生导师, 主要研究方向为数字图文信息处理、色彩再现理论与应用、印刷数字化工作流程.

E-mail: lunaprint@163.com