

基于色相角聚类的图像色域边界快速提取方法

张建青¹, 沈晓莹², 田全慧¹, 刘真¹

(1.上海理工大学, 上海 200093; 2.海洋环境保障中心, 北京 210046)

摘要: **目的** 基于色相角聚类的方法对图像像素进行排列, 在此基础上提取图像色域边界, 达到零误差快速提取图像色域边界。**方法** 在设备无关色空间的球坐标系中, 依据指定颜色属性值的顺序, 依次由大到小排列图像中的像素, 按照边界点特征提取图像的色域边界点, 在上述排列图像像素的基础上, 进行“图像到设备”的色域映射。**结果** 对于实验选用图像, 提出的方案可零误差取出图像的边界点, 计算平均时间仅需 2.6 s, 用 CIE 推荐的局部最大值色域边界描述法(SMGBD)计算图像边界点, 平均误差大于 $3\Delta E_{ab}^*$, 平均计算时间大于 1 min; 在色相角聚类排列图像像素的基础上进行的最小色差法色域映射, 极大地提高了计算速度。**结论** 基于色相角聚类的图像色域边界点提取方法可以快速零误差提取图像边界点, 在此基础上进行的色域映射计算, 去掉了冗余计算, 提高了计算速度, 对实现从图像到设备的色域映射有重要意义。

关键词: 色彩管理; 色域边界描述; 快速色域映射

中图分类号: TS801.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)03-0139-05

Rapid Extraction Method of Image Gamut Boundary Based on Hue Angle Clustering

ZHANG Jian-qing¹, SHEN Xiao-ying², TIAN Quan-hui¹, LIU Zhen¹

(1.University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2.Marine Environmental Ensuring Center, Beijing 210046, China)

ABSTRACT: The work aims to arrange the image pixels based on hue angle clustering method, so as to quickly and accurately extracting image color gamut boundary. In the spherical coordinates of device independent color space, pixels in the image were arranged in the descending order according to color attribute values, then, gamut boundary points were extracted from the image according to boundary point features. Based on the image pixels arranged above, the “image-to-device” gamut mapping was calculated. With respect to the image selected by the experiment, the proposed plan could extract the image boundary points accurately, with an average calculating time of only 2.6 s. The image boundary points were calculated in the local maximum gamut boundary description method (SMGBD) recommended by CIE, with the average error more than $3\Delta E_{ab}^*$ and the average calculating time greater than 1 min. The gamut mapping of the minimum color difference method based on the image pixels arranged by hue angle clustering greatly improved the calculation speed. The method extracting image color gamut boundary points based on hue angle clustering can quickly extract the image boundary points with zero error. Based on that, the gamut mapping was calculated. Such calculation removes the redundant computation and improves the calculation speed, which has great significance for developing the image-to-device gamut mapping.

KEY WORDS: color management; gamut boundary description; fast color gamut mapping

受益于各类数字图像设备的发展和应用, 彩色图像可以快速方便地通过各种数字图像设备复现, 人们

在享受各类数字图像设备带来便利的同时, 对复现图像质量的要求也越来越高, 因此, 保证颜色在不同承

收稿日期: 2016-05-16

基金项目: 上海理工大学科技发展项目 (16KJFZ017)

作者简介: 张建青 (1972—), 女, 博士生, 主要研究方向为跨媒体颜色复制, 色彩管理等。

通讯作者: 刘真 (1953—), 女, 上海理工大学教授、博导, 主要研究方向为印刷光学工程、色彩再现理论与应用等。

载介质之间的准确传递尤为重要。不同类型的数字图像设备,其色域形状和大小各异,当彩色图像在不同设备间传输时,常会出现颜色失真现象,其最佳解决方案是设计合适的色域映射算法,最大程度地降低颜色的失真现象。为尽可能充分利用目标设备的色域,提高颜色复现精度,目前常用的是“图像到设备”的色域映射算法。图像与图像之间千差万别,其色域大小和形状各不相同,因此在色域映射时,需要精确地描述图像的色域边界^[1-2]。目前已有的描述色域边界的方法主要有凸壳算法^[3]、 α -shapes 法^[4]、局部最大值色域边界描述法(Segment Maxima Gamut Boundary Descriptor)^[5-6]等,其中最常用的方法是 CIE 推荐的 SMGBD 法。这些算法都会带来一定的边界计算误差,凸壳算法通过假设色域边界是凸壳来进行计算,不能很好地描述非凸色域边界; α -shapes 算法需要通过大量的实验计算,最终才能得到合适的 α 值,若 α 值选取不当,得到的图像色域边界误差较大;SMGBD 法,将色域空间划分为多个分区,每个分区中提取一个极值点作为该分区边界点的代表点组成 GBD 矩阵,基于 GBD 矩阵进行插值计算得到某等色相面的代表边界点 LGB,在 LGB 点的基础上计算映射方向上所对应的色域边界点,计算过程中多次采用了插值计算,计算误差是不可避免。

以上方法获取的图像边界点误差较大,无论映射算法本身多么优秀,图像边界计算误差都不可避免地传递到映射计算过程中,导致最终的映射结果存在较大的颜色失真问题。常规的色域映射算法逐点读取图像的颜色信息,逐点完成映射计算^[7],对于图像中完全相同的颜色会重复进行映射计算,造成了大量冗余的计算。针对上述情况,研究提出一种基于图像色域边界准确提取的快速色域映射方案,对图像中的像素重新排序,在此基础上准确提取图像色域边界,对重新排序后的像素进行色域映射计算,去掉重复的计算,提高计算速度。

1 现有“图像到设备”色域映射算法计算流程及其不足

色域映射包括色域边界描述和颜色映射 2 个步骤,即进行颜色映射前,要对图像色域边界和目标设备色域边界进行准确地描述,在此基础上按照具体的映射算法将源图像颜色点映射到目标设备色域范围内。色域映射过程中对颜色进行计算的具体过程为:首先确定设备无关色空间,将数字图像、目标设备的颜色值转换到该空间,之后,逐点读取图像中的像素,并计算该颜色点对应的目标设备色域边界点和图像色域边界点(图像色域是源色域,如果采用裁切类色域映射算法,映射计算中只需要目

标设备的色域边界),然后按照所采用的映射算法在等色相面上将图像颜色映射至目标设备的色域内,完成图像中所有颜色的映射,将映射后的图像转换为目标设备色空间相关的图像,在目标设备上再现映射后的图像^[2,6-9]。

由上述流程可知,常规的“图像到设备”的色域映射采用逐点读取图像信息,逐点完成映射的方案,对于图像中完全相同的颜色会重复进行计算。大部分图像中,都存在着大量属性相同或相近的颜色,见图 1。图 1a 是一幅数字图像,图 1b 该图像的颜色点在 Lab 均匀色空间中的立体分布,其中的散点是图 1a 中的像素点,线性边框表示的是 sRGB 色空间的色域范围。由图 1b 可知,有较多的颜色点存在于同一个色相面上,因此,常规的映射方案中存在着大量的冗余计算,造成了计算时间的浪费。

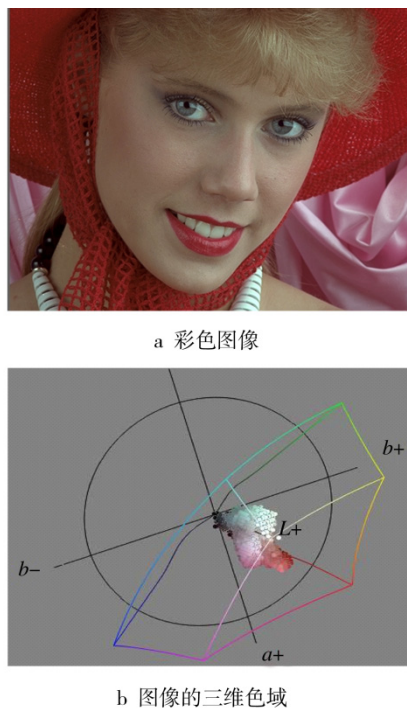


图 1 彩色图像及其三维色域

Fig.1 Color image and its three-dimensional color gamut

另外,当采用压缩类映射算法时,需要首先计算出图像的色域边界,多位研究者提出了凸壳算法、 α -shapes 法、SMGBD 以及对这些算法的改进方案^[10-15],但不管采用哪种描述方法,都有插值或拟合的计算过程,因此,计算误差是不可避免的。

2 图像色域边界点准确提取方案

聚类分析法是一种常见的多元统计方法,此方法依据集合中样本间的某种相似属性,将原始数据分为若干子集。色相是感知辨别颜色的最主要的颜色属性,大部分的色域映射算法都是以保持色相角恒定为

映射原则，即在等色相面上进行映射计算^[16]。研究以色相角为聚类分类依据，将数字图像的像素分为多个类别。

2.1 精确提取图像色域边界的算法机理

精确提取图像色域边界 AECGBP (accurately extracting color gamut boundary points of image) 算法简单易用，以色相角为聚类分类依据，在每一个子类中按照仰角以及球半径的值，顺序排列像素值，提取边界点。选择 CIELAB 设备无关色空间作为映射空间，提取边界点的具体步骤如下所述。

1) 将图像像素在球坐标系中表示，即用色相角 α 、仰角 θ 以及球半径 r 表示图像中的像素，并记录每个像素的原始位置，组成数据集 ψ_0 。

2) 依次按照 α 、 θ 和 r 的由大到小排列像素，组成数据集 ψ_1 。

3) 在等色相角平面内，提取每个仰角 θ 下的像素中，球半径 r 最大的点，该点就是边界点；精确提取图像所有的边界点，组成边界点集合 ψ_2 。

2.2 精确提取图像边界算法的评价

为了对 EACGBP 算法的性能进行评价，以图 2 的 3 幅数字图像作为源图像，将这些图像嵌入 sRGB 的 .icc 特征文件，分别采用 SMGBD 算法和 AECGBP 算法提取图像的边界点，并比较了多种分区方式的 SMGBD 算法。比如 SMGBD (6×6) 表示 SMGBD 算法中对色相角以及仰角都等间隔划分了 6 区域，共 36 个分区。



图 2 验证快速提取边界算法的示例

Fig.2 Examples for verification of fastly extracting color gamut boundary points

首先采用 EACGBP 算法提取图像的色域边界点，将提取的边界点定义为数据集 A ，然后以 A 中颜色点的色相角以及仰角数据组合为已知信息，选用 SMGBD 色域边界描述方法，求解已知色相角和仰角下的图像色域边界点；然后计算 EACGBP 算法提取的边界点与 SMGBD 算法计算的边界点之间的 Lab 色差，色差单位为 ΔE^*_{ab} 。

表 1 中列出了 3 幅图像的总像素数以及边界点数量，并计算了边界点占总像素数的比例，然后是 AECGBP 算法所用计算时间。由表 1 的数据可知，对于图 2 中不同的 3 幅示例图像，其边界点像素的数量均不到总像素数的 15%，说明常规的映射方案中确实存在着大量的冗余计算。表 2 中统计了采用不同 SMGBD 时，计算 3 幅示例图像的边界点所用时间以及计算精度。以色差来衡量计算误差，其单位是 ΔE^*_{ab} 。（文中所有的计算所用的计算机主机型号为 Alienware AURORA-R4；处理器为 Inter(R) Core(TM)i7-3930 CPU @3.20 Hz 3.20 GHz；RAM 16.0 G；Microsoft Windows 10 系统。）

由表 1 的数据可知，采用 EACGBP 算法提取图像色域边界点无任何误差，且计算时间短；表 2 的数据说明 SMGBD 计算出的图像色域边界点和实际边界点之间的平均误差较大，而且需要较长的计算时

间，分区数不同时，提取图像所需计算时间也不一样，随着图像内容的不同，不同分区方式计算所需时间差异较大。由于 EACGBP 算法仅采用了简单的排列、比较，没有插值计算，因此提取的图像边界点没有任何误差，在边界提取过程中，没有插值计算，只是对数据进行了排列比较，因此计算速度非常快。

表 1 图像边界点统计以及 AECGBP 算法计算时间
Tab.1 Statistics of image boundary points and computing time of AECGBP

	总像素数	边界点数	边界点数的比例/%	AECGBP算法	
				计算时间/s	最大误差 ΔE^*_{ab}
示例图像1	196 608	20 474	10.4	1.01	0
示例图像2	393 216	53 348	13.6	5.6	0
示例图像3	196 608	21 526	10.95	1.2	0

传统的映射方法是逐点提取图像中的像素点进行映射计算，因此在实际映射计算过程中，对于示例图像 1 要进行 196 608 次边界点的计算，而不是本案例中的 20 474 次，因此采用传统的映射方法时，边界点的计算中约 90% 的计算是重复计算。EACGBP 算法比 SMGBD 算法更适合提取图像的边界点。

表 2 SMGBD 算法提取图像边界点时的计算时间和精度比较

Tab.2 Computing time and accuracy comparison for SMGBD used to extract color gamut boundary points

	SMGBD (6×6)		SMGBD (10×10)		SMGBD (15×15)		SMGBD (20×20)	
	计算 时间/s	平均/最 大误差	计算 时间/s	平均/最 大误差	计算 时间/s	平均/最大 误差	计算 时间/s	平均/最 大误差
示例图像1	63	4.83/36.51	85	4.47/35.38	64	4.47/41.13	103	4.51/43.87
示例图像2	202	5.95/55.69	352	5.88/55.71	253	5.75/55.69	458	5.65/57.43
示例图像3	73	9.43/55.36	138	8.6/55.14	114	7.94/50.44	94	7.87/54.36

3 快速色域映射方案

3.1 快速色域映射机理

由上面的分析可知,传统的色域映射算法中,存在着大量的冗余计算。结合图像边界点提取方法,研究提出一种色域映射的改进方案,该方案去掉了传统映射计算中的冗余计算,加快了计算速度。首先按照色相角聚类的方法将数字图像中的像素重新排列,然后用数据集 ψ_1 来完成映射计算,用 SMGBD (6×6) 描述目标设备的色域边界点。具体映射的计算流程见图 3,对于位于同一个色相面的颜色点,映射过程中,只需要计算一次目标设备的等色相面边界线,位于同

一条映射方向线上的点,只需要计算一次目标设备的边界点;所有像素点都映射完之后,按照 ψ_1 中记录的像素点的原始位置,将映射后的像素位置复原。

3.2 快速色域映射方案的计算速度评价

以图 2 中的 3 幅示例图像作为源图像,该图像嵌入 sRGB 的 .icc 特征文件,目标设备为 EPSON7910 打印机,采用最小色差法 HPMINDE(Hue-angle preserving minimum ΔE^*_{ab} clipping)将源图像映射到目标设备的色域范围内,比较原始 HPMINDE 算法和改进的快速 HPMINDE 算法的计算时间。结果见表 3,对于不同的数字图像,快速的 HPMINDE 算法所用计算时间约为原始的映射算法计算时间的 1/3,其计算速度比原始的 HPMINDE 提高了 3 倍。

表 3 HPMINDE 算法和快速 HPMINDE 算法计算时间比较
Tab.3 Computing time for HPMINDE and fast HPMINDE
s

	计算时间	
	原始映射算法	快速映射算法
示例图像 1	216	60.1
示例图像 2	446.7	149.2
示例图像 3	218.76	60.95

4 结语

在“图像到设备”类的色域映射计算中,图像色域边界点的描述准确与否,直接影响映射结果的精度,而传统的按序逐点读取图像像素完成映射的方案中,存在着大量的冗余计算,研究提出的基于色相角聚类的图像色域边界点准确提取方案,实现了快速零误差的提取图像色域边界点,基于色相角聚类对图像像素排序后进行的色域映射提高了映射计算速度,更有利于实现快速准确地复制彩色图像。

参考文献:

- [1] SAITO R, KOTERA H. Image-dependent Three-dimensional Gamut Mapping Using Gamut Boundary Descriptor[J]. Journal of Electronic Imaging, 2004, 13(3): 630—638.

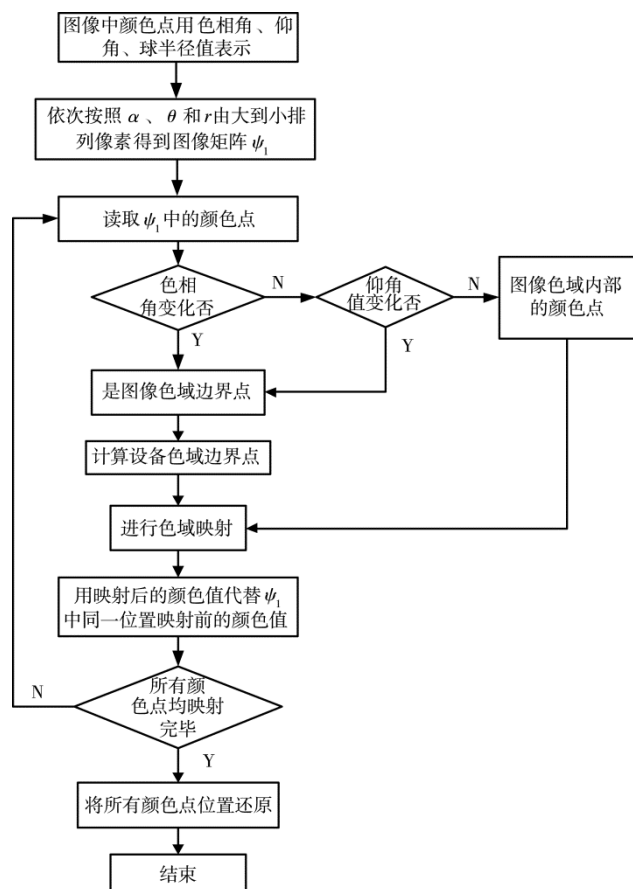


图 3 快速色域映射算法流程

Fig.3 Flow chart of fast color gamut mapping algorithm

- [2] 许向阳, 朱元泓, 桑凤仙. 与图像内容相关的色域映射算法研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2012, 37(5): 626—629.
XU Xiang-yang, ZHU Yuan-hong, SANG Feng-xian. Image-dependent Gamut Mapping Algorithm[J]. Geometrics and Information Science of Wuhan University, 2012, 37(5): 626—629.
- [3] 张忠武, 吴信才. 平面海量散乱点集凸壳算法[J]. 计算机工程, 2009, 35(9): 43—48.
ZHANG Zhong-wu, WU Xin-cai. Algorithm for Convex Hull of Planar Massive Scattered Point Set[J]. Computer Engineering, 2009, 35(9): 43—48.
- [4] CHOLEWO T J, LOVE S. Gamut Boundary Determination Using Alpha-shapes[C]// Proceedings of IS & T and SID's 7th Color Imaging Conference: Color Science, Systems and Applications, 1999: 200—204.
- [5] MOROVIC J, LUO M R. Calculating Medium and Image Gamut Boundaries for Gamut Mapping[J]. Color Research and Application, 2000, 25(6): 384—401.
- [6] MOROVIC J, LUO M R. The Fundamentals of Gamut Mapping: A Survey[J]. Journal of Imaging Science Technology, 2001, 45(3): 283—290.
- [7] MOROVIC J. Color Gamut Mapping[C]// John Wiley & Sons, Chichester, England, 2008.
- [8] GIESEN J. Toward Image-dependent Gamut Mapping: Fast and Accurate Gamut Boundary Determination[J]. Color Imaging X: Processing, Hardcopy, and Applications, 2005: 201—210.
- [9] SCHUBERTH E, SIMON K, ZOLLIKER P. Toward Image-dependent Gamut Mapping: Fast and Accurate Gamut Boundary Determination[C]// Color Imaging X: Processing, Hardcopy, and Applications, 2004: 201—210.
- [10] 杨露, 刘真. 带插值最小二乘法在打印机色域边界描述中的应用研究[J]. 包装工程, 2013, 34(11): 80—84.
YANG Lu, LIU Zhen. Application Research of Least Squares with Interpolation in Printer's Gamut Boundary Description[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(11): 80—84.
- [11] 冀利利, 孔玲君, 刘真, 等. 基于区域分割法的图像色域边界描述[J]. 包装工程, 2014, 35(9): 110—116.
JI Li-li, KONG Ling-jun, LIU Zhen, et al. Image Gamut Boundary Descriptor Based on the Segment Maxima Method[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(9): 110—116.
- [12] 黄汉奇. 基于宽色域显示设备的色域映射研究[M]. 济南: 山东大学, 2014.
HUANG Han-qi. Research on Gamut Mapping of Wide Gamut Devices[M]. Jinan: Shandong University, 2014.
- [13] 况盛坤, 王晓红, 吕兆锋. 基于空间区域分割的四面体网格剖分色域描述算法[J]. 包装工程, 2014, 35(5): 126—130.
KUANG Sheng-kun, WANG Xiao-hong, LYU Zhao-feng. Color Gamut Descriptions Based on Space Region Partition of Tetrahedron Grid Subdivision[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(5): 126—130.
- [14] 汪祖辉, 孙刘杰, 邵雪. 一种 Lab 空间的色域边界描述算法[J]. 包装学报, 2016, 8(2): 53—56.
WANG Zu-hui, SUN Liu-jie, SHAO Xue. A Color Gamut Boundary Description Algorithm for Lab Space[J]. Packaging Journal, 2016, 8(2): 53—56.
- [15] 李志, 李儒琼. 一种改进的快速三维凸包生成算法及实现[J]. 计算机工程与科学, 2011(2): 129—132.
LI Zhi, LI Ru-qiong. An Improved Algorithm and Implementation of Three-dimensional Convex Hulls[J]. Computer Engineering & Science, 2011(2): 129—132.
- [16] 胡威捷, 汤顺青, 朱正芳. 现代颜色技术原理与应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2007.
HU Wei-jie, TANG Shun-qing, ZHU Zheng-fang. Modern Color Science and Application[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2007.