

基于空间区域分割的四面体网格剖分色域描述算法

况盛坤, 王晓红, 吕兆锋

(上海理工大学, 上海 200093)

摘要: **目的** 提出一种新的数字输出设备色域边界描述算法模型, 以实现数字输出设备色域的三维立体准确再现和色域体积的精确求取。 **方法** 通过空间区域分割算法确定 Epson Stylus Pro 7910 打印机呈色范围的最佳颜色空间分区, 利用四面体网格剖分技术对各分区色域边界进行描述, 同时从色域体积、边界点再现精度等方面, 对该方法和基于改进凸壳算法下的设备色域匹配适性进行对比分析。 **结果** 该色域边界描述新算法模型在描述的准确性和再现精度方面, 明显优于改进后的凸壳算法。 **结论** 该算法下各边界颜色点再现精度平均 ΔE 和最大 ΔE 均在 2 以内, 并且设备色域体积明显大于改进凸壳算法下的设备色域体积。

关键词: 空间区域分割; 四面体网格剖分; 色域边界描述

中图分类号: TS801.3

文献标识码: A

文章编号: 1001-3563(2014)05-0126-05

Color Gamut Descriptions Based on Space Region Partition of Tetrahedron Grid Subdivision

KUANG Sheng-kun, WANG Xiao-hong, LYU Zhao-feng

(University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

ABSTRACT: **Objective** To propose a new gamut boundary description algorithm model of digital output device, and achieve the accurate three-dimensional reproduction and obtained the gamut volume of digital output devices' gamut. **Methods** The optimal color space partition was determined that the color range of Epson Stylus Pro 7910 printer was described by space region partition, and the boundary of every partition was described. The gamut matching adaptability was compared and analyzed from the aspect of the color gamut volume and the accuracy of reproduced boundary points based on the new algorithm and improved convex hull algorithm. **Results** Analysis results showed that the new algorithm model of color gamut boundary descriptions proposed in this paper was superior to the improved convex hull algorithm in the accuracy and precision. **Conclusion** The reproduced accuracies, the mean and max ΔE of boundary points, were both less than 2 and the color gamut volume of the device was obviously better.

KEY WORDS: space region partition; tetrahedron grid subdivision; gamut boundary description

在彩色图像跨媒体复制^[1]过程中, 不同设备之间的呈色机理、承印载体等的使用不同, 使得彩色图像在这些设备之间的准确传递、还原再现和过程控制变得比较困难。用色彩管理解决该问题时, 色域映射是不可避免的。色域映射的第 1 步是色域边界的确定, 因此设备的色域边界描述就显得尤其重要。

国内外很多学者在色域边界描述算法方面进行了较为深入的研究, 提出了很多算法及方法模型。其中一种比较热门并且应用较广的是基于改进凸壳算法^[2-4]的设备色域边界描述方法。由于该方法在描述的精准性方面存在不足, 因此文中基于空间区域分割技术, 采用四面体剖分算法中应用最为广泛的

Delaunay 算法^[5]来提取和描述数字输出设备的色域边界,以实现数字输出设备颜色特征点信息的准确采集。

1 算法模型概述

1.1 三维 Delaunay 四面体剖分技术

文中采用基于 Delaunay 的四面体剖分算法^[6-7]来实现对数字输出设备的色域进行提取和描述,三维 Delaunay 四面体剖分法则为:对于三维空间一系列散点所构建的四面体网格,若每个四面体的外接球都不包含除了组成该四面体 4 个顶点外的第 5 个网格点,则此四面体被称为 Delaunay 四面体。在已知的散点中如果不存在 5 点共球的情况,其 Delaunay 网格是唯一的。结合区域分割理论,文中将四面体网格剖分技术运用于数字输出设备的色域边界描述。

1.2 空间区域分割最佳分区建立

对区域分割^[8-9]最佳分区建立的探讨,是实现不同色表与基于空间区域分割四面体剖分描述方法的设备色域边界描述最优化匹配的前提,在基于算法描述过程获得的设备色域边界点基础上,结合四面体网格剖分技术实现设备色域的三维立体准确再现和色域体积的求取。基于 BP 数字输出设备色彩特性化模型,可以在设备 Epson Stylus Pro 7910 校准优化的基础上,获取 ECI2002 中 CMYK 数据与对应的 LAB 数据。依托此方法可获得各色表在 $N \times N$ 分区下 Epson Stylus 7910 设备色域边界点对应色度数据值,从色域体积大小和边界点再现精度 2 方面,来确定各色表与空间区域分割四面体剖分描述方法表征下 Epson Stylus 7910 数字输出设备色域边界描述的最佳分区的评价方法模型。颜色空间范围 $N \times N$ 分区色相角角度间隔 i 和仰角角度 j 划分见表 1。

根据以上的分区,可以得到 ECI 2002 色表下的 Epson Stylus Pro 7910 数字设备色域体积量化大小,在基于空间区域分割的四面体网格剖分描述方法下的变化情况,据此可以得 ECI 2002 色表在空间分区节点 60×60 之前确定最佳分区值,其中 50×50 处体积最广。文中取 ECI 2002 色表 $8 \times 8, 10 \times 10, \dots, 60 \times 60$ 的分区,进行边界颜色点再现精度分析评价,以便确立该色表与空间区域分割的四面体网格剖分算

表 1 颜色空间 $N \times N$ 分区角度间隔分布
Tab.1 Angle interval distribution in color space
 $N \times N$ partition

$N \times N$ 分区	色相角 α 间隔 $i/(\circ)$	仰角 θ 间隔 $j/(\circ)$
8×8	45.0000	22.5000
10×10	36.0000	18.0000
12×12	30.0000	15.0000
...		
56×56	6.4286	3.2143
58×58	6.2069	3.1034
60×60	6.0000	3.0000

法下的最佳分区。ECI 2002 色表与该描述方法匹配下各边界颜色点再现精度分布见图 1。

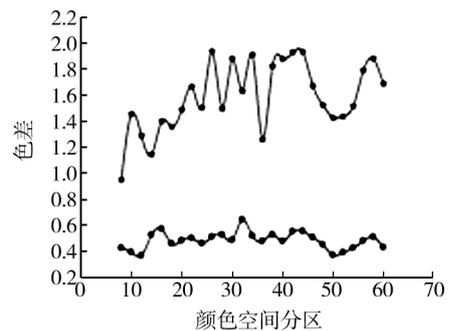


图 1 不同分区下设备色域边界点再现精度分布

Fig.1 Accuracy distribution at color gamut boundary points in different partition

结合图 2 不同分区边界点再现精度分布数据变化可知,四色表与空间区域分割的四面体网格剖分算法匹配下,各边界颜色点精度 ΔE (Mean 和 Max) 均在 2 以内,符合人眼视觉差别对高质量印刷品的精度要求。

经分析可以确定 ECI 2002 色表颜色特征点与空间区域分割的四面体网格剖分设备色域边界描述方法匹配下,颜色空间最佳分区为:ECI 2002 色表在空间分区 50×50 处效果最佳。

2 算法模型思想

基于空间区域分割的四面体剖分色域边界描述算法模型实现,其算法思想为:结合区域分割和四面体网格剖分理论,在对基于色表的离散点数据信息在 CIELAB 空间进行区域分割,通过对不同色表表征下最佳分区的探讨,来实现对各子区域极大值点的获

取。所有子区域边界点的集合作为当前色表下设备色域边界点。之后根据四面体剖分技术对各子区域边界点进行剖分,实现对 Epson Stylus Pro 7910 打印设备色域的三维立体描述。同时结合已获取子区域各小四面体体积(V)求和,实现对该设备色域边界描述的量化表征。

3 算法模型实现过程

为确保设备的稳定性,在算法模型实现之前需要对 Epson Stylus Pro 7910 数字喷墨打印机进行校正。选取了一数码打样纸和测量设备以及相应软件对该打印机的一致性和重复性进行了测试,测试表明这两项指标均表现良好。使用 EFI ColorProof XF4.5 对打印机进行基础线性化。设备线性化效果评测结果表明该设备各方面的状态良好。采用 G7 工艺^[10-11]控制 P2P25X 样张,基于灰平衡校正对测试文件做阶调补偿,进一步使打印印刷品在满足颜色复现精度要求的同时,也能满足人眼的视觉特性。另外,由于目前在制作输出设备 ICC 特性文件时,ECI 2002 色表用的最多,因此文中选取 ECI 2002 色表作为基础色表。

基于空间区域分割的四面体剖色域分边界描述^[12-13]算法模型实现,其具体实验过程主要包括以下几方面。

1) 获取数据源。在设备基于传统 EFI 和 G7 校正的基础上,在 Epson Stylus 7910 上获取 ECI 2002 的 $L^*a^*b^*$ 色度数据值,以此作为构建后续该设备色域边界范围描述的数据源。

2) 色度数据坐标转换。将 CIE $L^*a^*b^*$ 坐标转换至球面坐标 $\gamma\alpha\theta$,其中 γ 表示极径,即球内任意颜色点到球心的距离; α 表示色相角,数据范围为 $0 \sim 360^\circ$; θ 表示仰角,即某一恒定色相角所在平面上的张角,其数据范围为 $0 \sim 180^\circ$ 。直角坐标向极坐标转换见式(1)。

$$\gamma = [(L-L_E)^2 + (a-a_E)^2 + (b-b_E)^2]^{1/2}$$

$$\alpha = \arctan \frac{(b-b_E)}{(a-a_E)} \quad (1)$$

$$\theta = \arctan \frac{(L-L_E)^2}{[(a-a_E)^2 + (b-b_E)^2]^{1/2}}$$

3) 颜色空间区域分割。分别将 α 和 θ 以角度 i 和 j 均分成 N 份,从而可以将整个颜色空间分成 $N \times N$ 个子区域,区域分割可视化效果见图 2,其中点 $E(L^* = 50, a^* = 0, b^* = 0)$ 表示求取各子区域极大值参考点。

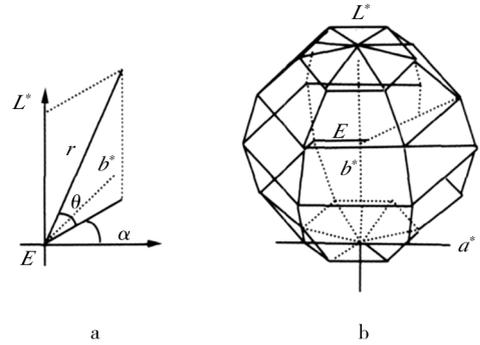


图2 区域分割可视化效果

Fig. 2 Visual effect of regional segmentation

4) 根据分区,获取极坐标下各个子区域极大值点位置索引 $K_i (i=1, 2, \dots, N)$,依据该索引 K_i 输出原 CIE $L^*a^*b^*$ 色度坐标 L^*, a^* 和 b^* 值;

5) 数据去重。通过数据去重,消除因色表本身数据信息影响而带来的虚假边界,最终获取当前色表与算法表征下色域边界数据。

4 实验结果分析

基于改进凸壳算法的设备色域边界描述方法。对 ECI 2002 色表在这种色域边界描述算法下的色域匹配^[14-15]适性做了分析,并与文中提出的基于空间区域分割四面体网格剖分的设备色域边界描述算法进行了对比。

4.1 基于改进凸壳算法的设备色域边界描述方法的分析

类似的,ECI2002 色表在基于改进凸壳算法的设备色域边界描述方法下基于 Epson Stylus Pro 7910 数字设备色域边界点散点分布见图 3d。该描述方法下边界点在颜色空间 ab 与 Lb 平面分布分别见图 3e 和图 3f。各色表颜色特征点下,基于改进凸壳算法边界面描述设备色域三维立体分布见图 4b,可求出 ECI 2002 色表在基于改进凸壳算法描述下的设备色域体积为 446 292.808 12。

4.2 对比分析与评价

ECI 2002 色表下的 Epson stylus Pro 7910 数字设备色域范围,在基于空间区域分割的四面体网格剖分和基于改进凸壳算法下的设备色域边界点散点分布见图 3。

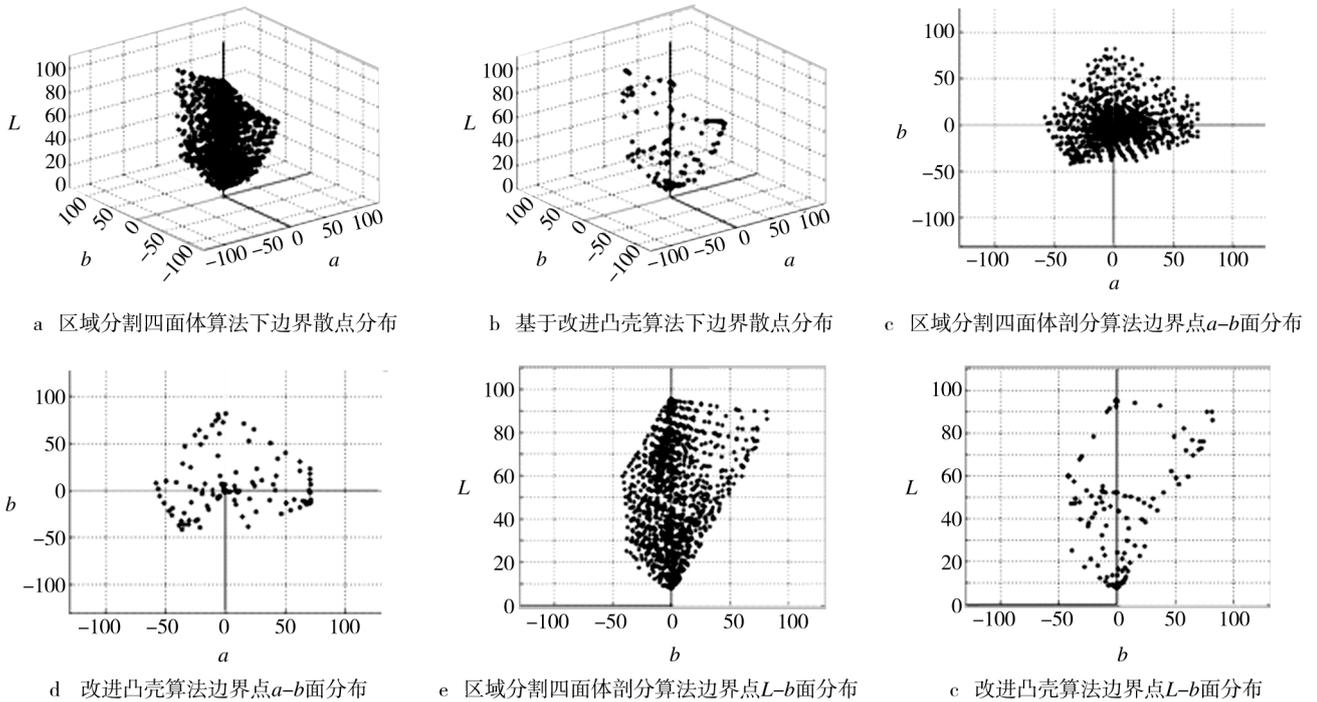


图 3 基于空间区域分割的四面体网格剖分(a,b,c)和基于改进凸壳算法(d,e,f)下的设备色域边界点散点分布

Fig. 3 Device gamut boundary scatter point distribution based on tetrahedron grid subdivision(a,b,c) and improved convex hull algorithm(d,e,f)

分析图 3 可知,整体边界点分布上(见图 3a), ECI 2002 色表下基于设备色域边界点整体分布下的算法适性比较,空间区域分割四面体剖分描述方法明显优于改进后的凸壳描述方法。 ab 平面(见图 3b),空间区域分割四面体剖分描述方法下 ECI 2002 色表在颜色点信息量与颜色表现范围上扩展性最好,呈现色域范围较广,尤其是在紫色、青色、绿色及黄绿色区域,其颜色饱和度较高,均要优于基于改进凸壳算法下的散点分布情况。 Lb 平面(见图 3c), ECI 2002 色表下 2 种设备色域边界描述方法在该面的边界点分

布,改进的凸壳算法描述下虽在呈色范围上与空间区域分割四面体剖分算法描述下相似,但颜色信息饱和度和要明显差很多,颜色扩展性也较差。

ECI 2002 色表颜色特征点,基于空间区域分割的四面体网格剖分和基于改进凸壳算法下的设备色域三维立体分布图见图 4。

ECI 2002 色表颜色特征点,2 种设备色域边界描述方法下呈现量化体积值见表 2。

由表 2 以及图 4 色域体积大小和形状差异可知, ECI 2002 色表颜色特征点在不同设备色域边界描述

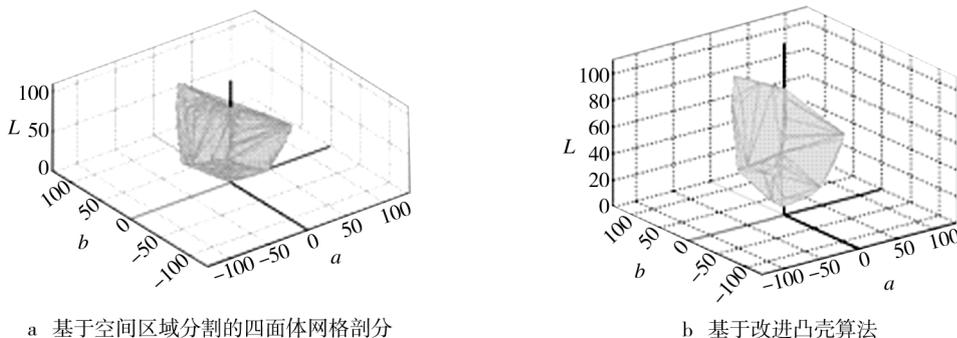


图 4 设备色域三维立体分布

Fig. 4 Device gamut 3-D distribution

表2 2种色域边界描述方法下的色域体积

Tab.2 Gamut volume of the two gamut boundary description algorithms

色表	色域边界描述方法	色域体积大小
ECI 2002	改进的凸壳算法	446 292. 808 12
	空间区域分割的四面体网格剖分算法	454 793. 464 36

方法下对设备色域边界的描述。虽呈色范围形似,但因算法获取的边界颜色信息点和算法本身解析机理不同,使得体积变化差异较大,文中算法下设备色域体积能达到 454 793. 464 36。

5 结语

通过实验对比可知,在色域边界描述的准确性、色域范围、边界点再现精度等方面,文中提出的基于四面体网格剖分色域边界描述算法的色域匹配适性优于改进后的凸壳算法。这点通过实验分析,在其他同一色表表征下也同样适合。由于该实验没有对该方法用于输入设备或者显示设备等其他相关设备的色域边界描述的精准性进行研究,可以在未来的研究工作中加以验证,看是否具有同样的适用性。

参考文献:

- [1] 王强. 现代色彩复制理论与技术发展综述[J]. 中国印刷与包装研究, 2009(4): 7—13.
WANG Qiang. The Theory and Technology Development of Contemporary Color Reproduction [J]. China Printing and Packaging Study, 2009(4): 7—13.
- [2] 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.
- [3] 吕志强, 司明. 关于离散点集的三维凸包的研究[J]. 黑龙江科技信息, 2010(9): 70.
LYU Zhi-qiang, SI Ming. Research on Three-dimension Convex about Discrete Point Set [J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2010(9): 70.
- [4] DAY A M. Planar Convex Hull Algorithms in Theory and Practice [J]. Computer Graphics, 1998(3): 177—193.
- [5] 陈学工, 潘懋. 空间散乱点集 Delaunay 四面体剖分切割算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2002(1): 93—95.
CHEN Xue-gong, PAN Mao. Delaunay Triangulation Cutting Algorithm for a Set of Irregularly Located Spatial Points [J]. Journal Of Computer - Aided Design & Computer Graphics, 2002(1): 93—95.
- [6] 周倩, 刘真, 朱明. 3种主流分色算法的误差分析[J]. 包装工程, 2011, 32(7): 107—111.
ZHOU Qian, LIU Zhen, ZHU Ming. Errors Analysis of Three Major Color Separation Algorithms [J]. Packaging Engineering, 2011, 32(7): 107—111.
- [7] GELFAND N, GUIB-AS L J. Shape Segmentation Using Local Slippage Analysis [C] // Proceedings of the Euro Graphics/ACMSIGGRAPH Symposium on Geometry Processing, 2004.
- [8] LIU R, ZHANG H. Segmentation of 3D Meshes through Spectral Clustering [C] // Proceedings of the 12th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications, 2004.
- [9] 胡建伟, 方林聪, 刘利刚, 等. 基于 Delaunay 四面体剖分的网格分割算法 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2009(12): 1729—1732.
HU Jian-wei, FANG Lin-cong, LIU Li-gang, et al. Mesh Segmentation Based on 3D Delaunay Triangulation [J]. Journal Of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2009(12): 1729—1732.
- [10] 胡媛, 司占军, 董雷. 基于 G7 方法的印刷标准化测试方法研究 [J]. 包装工程, 2011, 32(19): 111—114.
HU Yuan, SI Zhan-jun, DONG Lei. Research on Printing Standardization Test Method Based on G7 Method [J]. Packaging Engineering, 2011, 32(19): 111—114.
- [11] 刘瑞芳. 解析 G7 与其他印刷设备校准法 [J]. 包装工程, 2011, 32(5): 80—83.
LIU Rui-fang. Analysis of G7 and Other Calibration Methods of Printer [J]. Packaging Engineering, 2011, 32(5): 80—83.
- [12] OUYANG M, HUANG S W. Determination of Gamut Boundary Description for Multi-primary Color Displays [J]. Opt Express, 2007(15): 13388—13403.
- [13] 息丽丽, 王义峰, 刘瑞华, 等. 基于 B 样条色域边界描述的颜色匹配 [J]. 计算机工程, 2008(1): 210—211.
XI Li-li, WANG Yi-feng, LIU Rui-hua, et al. Color Mapping Based on Gamut Description of B-spline Curve Fitting [J]. Computer Engineering, 2008(1): 210—211.
- [14] JOACHIM G, EVA S, KLAUS S, et al. Toward Image Dependent Gamut Mapping: Fast and Accurate Gamut Boundary Determination [J]. Proc SPIE, 2005, 5667: 201—210.
- [15] JOACHIM G, SCHUBERT E, SIMON K, et al. Toward Image-dependent Gamut Mapping, Fast and Accurate Gamut Boundary Determination [J]. Proc SPIE, 2005, 5667: 201—210.