

文章编号 1004-924X(2016)02-0292-08

## 显示器的实时色彩管理

吕国强<sup>1,3\*</sup>, 梁蓝天<sup>1,2</sup>, 芦云龙<sup>1,3</sup>, 张应松<sup>1,2</sup>, 方 勇<sup>1,3</sup>

- (1. 合肥工业大学 特种显示技术教育部重点实验室 特种显示技术国家工程实验室  
现代显示技术省部共建国家重点实验室, 安徽 合肥 230009;
2. 合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009;
3. 合肥工业大学 光电技术研究院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:** 基于动态影像切换速度快的特点, 提出一种可内嵌于显示器中, 通过硬件实现的色彩管理方法来提高显示器图像颜色信息的一致性。研究了 ICC 规范的色彩管理理论, 基于三维查找表与插值法, 建立了显示器驱动信号值间的非均匀查找表; 利用查找表数据, 通过三维插值算法实现了显示器的色彩管理, 并通过对图像特征的判断完成了自适应渲染功能。在现场可编程门阵列上建立了基于该方法的显示器实时色彩管理系统, 利用该系统对两台显示器进行了色彩管理实验。结果表明, 在实行色彩管理前后, 两台显示器的最大色差/平均色差分别为 14.56/5.08 与 5.4/1.83 $\Delta E_{uv}$  色差单位; 使用自适应渲染功能则较好地保留了原图像的细节信息。该系统可对显示器进行较高精度的色彩管理, 且满足高分辨率动态影像实时性的需求。

**关键词:** 显示器; 色彩管理; 色域映射; 现场可编程门阵列

**中图分类号:** TN141.9 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162402.0292

## Real-time color management for displays

LÜ Guo-qiang<sup>1,3\*</sup>, LIANG Jian-tian<sup>1,2</sup>, LU Yun-long<sup>1,3</sup>, ZHANG Ying-song<sup>1,2</sup>, FANG Yong<sup>1,3</sup>

- (1. *Key Laboratory of Special Display Technology of the Ministry of Education, National Engineering Laboratory of Special Display Technology, National Key Laboratory of Advanced Display Technology, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;*
  2. *School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;*
  3. *Academy of Photoelectric Technology, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)*
- \* *Corresponding author, E-mail: guoqianglv@hfut.edu.cn*

**Abstract:** On the basis of the high switching speeds of dynamic images, a color management method implemented by hardware was proposed to ensure the consistency of color information of images on different displays. The principle of ICC color management was researched, and a non-uniform look-up table between the RGBs of displays was established based on a look-up table and interpolation meth-

收稿日期: 2015-06-18; 修订日期: 2015-08-15.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2012AA011901)

od. The color management was realized by three dimensional interpolation with look-up tables and the self-adaptive rendering was obtained by judging the characters of images. Meanwhile, a real-time color management system was designed under a Field-Programmable Gate Array by proposed method. The experiments were performed for two displays. The experimental results indicate that the maximum/average color errors of two displays before and after using this system are 14.56/5.08 and 5.4/1.83  $\Delta E_{uv}$  unit, and the detail information of images is retained quite well by self-adaptive rendering. It concludes that the system implements higher precision color management for displays and satisfies the requirements for the precision, real time and stabilization.

**Key words:** display; color management; gamut mapping; Field Programming Gate Array(FPGA)

## 1 引言

随着计算机及多媒体技术的发展,液晶显示器、等离子显示器及数字光处理投影仪等设备得到了广泛应用。人们在享受各种显示设备带来的丰富视觉体验的同时,也经受着图像在不同显示设备之间传输失真的困扰<sup>[1]</sup>。目前,主要通过国际颜色协会(International Color Consortium, ICC)制定和推行的色彩管理方法<sup>[2]</sup>来控制彩色图像在不同数字图像设备上颜色信息的一致性,先利用设备的特性文件(ICC Profile)将设备色彩空间(RGB)与设备无关色彩空间(Lab 或 XYZ)建立对应的转换关系,再通过色彩管理模块(Color Management Module, CMM)调用相应的 ICC Profile 对不同设备进行色彩管理。ICC 规范不仅适用于显示器,还能对打印机、扫描仪、照相机等数字图像设备实施色彩管理,因此是一种通用的开放性色彩管理方法。然而,实施色彩管理的 CMM 依赖于操作系统,对系统有较高的硬、软件要求,在一般嵌入式系统或裸机系统等场合无法应用。此外,ICC 推行的色彩管理方法对图像中每一像素进行单独处理,未考虑相邻像素之间的关系,图像再现视觉效果仍有提升的空间。

本文针对显示器中图像颜色信息一致性及实时性的需求,提出了一种可内嵌于显示器中,基于硬件实现的色彩管理方法。在研究了 ICC 规范色彩管理的基础上,基于查找表(Look-up Table, LUT)与插值法,利用显示器的 ICC Profile 构建显示器驱动信号值(RGB)之间的非均匀 LUT;再通过四面体插值算法实现显示器的实时色彩管理;同时对图像特征进行判断,实现了自适应渲染的功能。该方法已在现场可编程门阵列(Field-

Programmable Gate Array, FPGA)上验证,能够实时性满足 1920×1080 高清分辨率动态影像高速切换的需求。

## 2 非均匀 LUT 的建立

在显示器 ICC Profile 中,每一种渲染方式通过两个规模为  $33 \times 33 \times 33$  的 LUT 分别记录显示器色彩空间到设备无关色彩空间(Profile Connection Space, PCS)的转换(RGB-Lab)及其逆转关系(Lab-RGB)。为了简化显示器色彩空间的转换过程,提高插值精度,这里建立了显示器驱动值 RGB 间的非均匀 LUT。

### 2.1 RGB-RGB LUT 的建立

ICC 规范中色彩空间的转换过程为:CMM 利用 ICC Profile 中的 RGB-Lab LUT 与 Lab-RGB LUT,通过插值算法将源色彩空间( $R_s G_s B_s$ )转换到目标色彩空间( $R_d G_d B_d$ ),中间经过 PCS。为减少运算步骤,降低系统内存消耗,满足实时性的需求,将与 PCS 转换相关的部分运算在系统外完成,即利用 matlab 软件建立 RGB-RGB LUT。

对于不同的渲染方式,通过 matlab 分别提取源显示器 ICC Profile 中相应的 AToB 和目标显示器 ICC Profile 中 BToA 的 CLUT 标签数据,将 AToB 的 CLUT 的输出作为 BToA 中 CLUT 的输入,进行插值运算,得到对应于输入值  $R_s G_s B_s$  的输出值  $R_d G_d B_d$ ,即建立了 RGB-RGB LUT。显示器色彩管理系统利用该 LUT 进行相关插值运算,实现显示器之间的色彩管理。

### 2.2 LUT 的非均匀化

通过硬件实现基于 LUT 与插值法的色彩管理,其关键在于满足显示内容实时性与转换精度

的需求。而提高转换精度主要有以下两个途径：一是使用更高精度的插值算法，二是提高 LUT 的密度。非线性插值算法<sup>[3-4]</sup>的插值精度较高，但模型复杂，运算量大，一般用于显示器的特性化过程<sup>[5-7]</sup>，难以满足实时转换的需求。而线性插值算法通过增加 LUT 的密度来提高插值精度。

增加 LUT 的密度会使其占用的硬件资源急剧上升，根据显示器的非线性特征，本文提出了一种非均匀 LUT 的建立方法。在 RGB 色彩空间内，在非线性较强的区域增加 LUT 的密度，而在线性度较好的区域降低 LUT 的密度。这样既可以提高非线性区域的插值精度，又尽可能地降低了资源的占用量。

在线性度较好的区域，对于同一种线性插值算法，利用不同密度的 LUT 进行插值运算，其结果相差不大。根据这一特性，可以使用同一种插值算法对不同密度的 LUT 进行插值运算，比较它们之间的差值分布，即可得到显示器的均匀性分布情况，进而为 LUT 的非均匀化提供分区参考依据。

ICC Profile 中的 LUT 规模为  $33 \times 33 \times 33$ ，不妨以它作为比较基准，将  $5 \times 5 \times 5$ 、 $9 \times 9 \times 9$ 、 $17 \times 17 \times 17$  规模的 LUT 的插值结果分别与  $33 \times 33 \times 33$  的进行比较。测试点集为  $0 \sim 255$ ，间隔为 8 的 RGB 灰阶组合，共 32 768 个测试点。插值误差定义为 R,G,B 3 通道的误差之和，为了便于观察，将大于一定阈值的插值误差点标记于 RGB 三维空间中，结果如图 1、图 2 与图 3 所示。

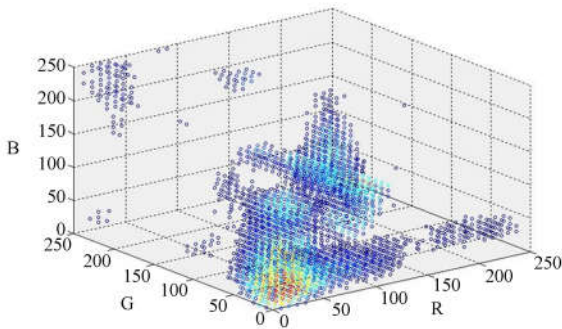


图 1  $5 \times 5 \times 5$ LUT 与  $33 \times 33 \times 33$ LUT 间大于 12 的误差点

Fig.1 Points with errors greater than 12 between  $5^3$  and  $33^3$  LUT

由图 1 与图 2 可知，误差点主要分布在低灰阶部分，说明显示器在该部分的非线性更突出，为

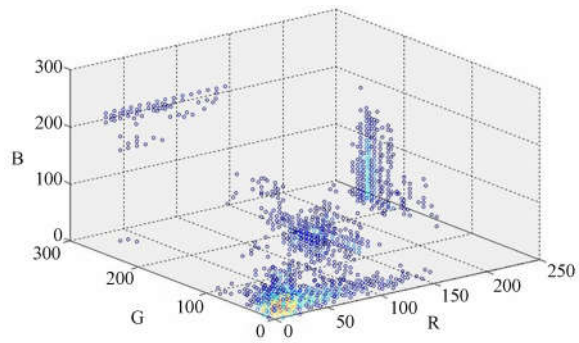


图 2  $9 \times 9 \times 9$ LUT 与  $33 \times 33 \times 33$ LUT 间大于 6 的误差点

Fig.2 Points with errors greater than 6 between  $9^3$  and  $33^3$  LUT

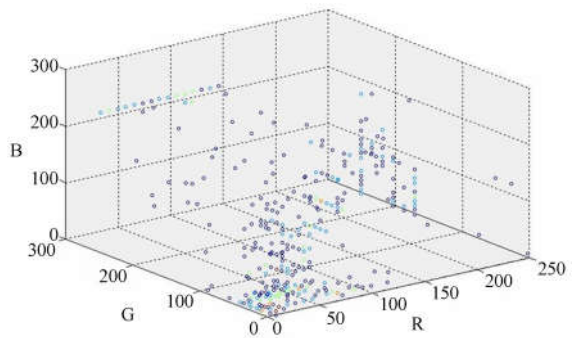


图 3  $17 \times 17 \times 17$ LUT 与  $33 \times 33 \times 33$ LUT 间大于 3 的误差点

Fig.3 Points with errors greater than 3 between  $17^3$  and  $33^3$  LUT

提高插值精度，应增加 LUT 在低灰阶的分布密度。

由图 2 可知，由于显示器在高灰阶的线性度较好， $9 \times 9 \times 9$  规模的 LUT 与  $33 \times 33 \times 33$  的插值结果差别不大。

由图 3 可知， $17 \times 17 \times 17$  规模的 LUT 与  $33 \times 33 \times 33$  的插值结果差别很小，即  $17 \times 17 \times 17$ LUT 可达到  $33 \times 33 \times 33$ LUT 的插值精度。

综上，建立非均匀 LUT，在  $R < 128, G < 128, B < 128$  部分使用  $17 \times 17 \times 17$  规模的 LUT 密度，其它部分使用  $9 \times 9 \times 9$  规模的密度。LUT 的数据点分布如图 4 所示。

利用非均匀 LUT 既保证了低灰阶的插值精度，又减小了 LUT 的规模。将非均匀 LUT 的规模与均匀 LUT 进行比较，结果如图 5 所示。可见，LUT 的非均匀化大大减小了硬件资源的消耗。

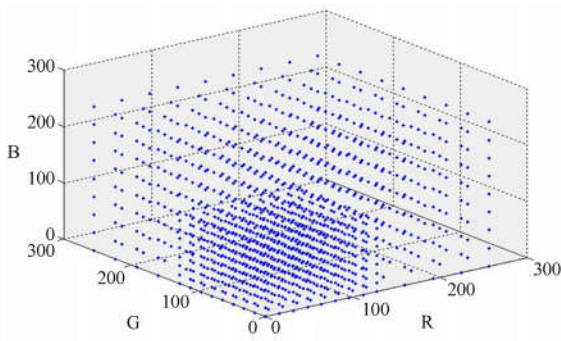


图 4 非均匀 LUT 的数据点分布  
Fig. 4 Distribution of non-uniform LUT

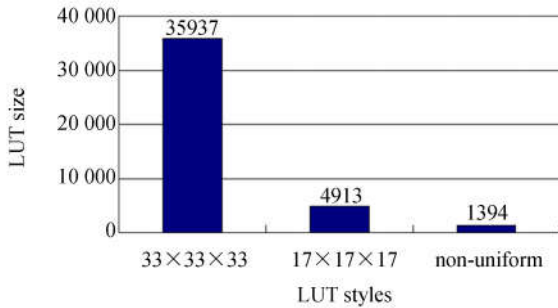


图 5 不同类型 LUT 的数据量  
Fig. 5 Data sizes of different types of LUT

### 3 三维插值算法

色彩管理中主要运算为三维插值,插值算法的选择将直接影响系统的精度与实时性等性能。用于色彩管理过程的三维插值算法主要有非线性三维插值算法与线性三维插值算法两种。由于非线性插值算法难以满足实时性要求,本文采用线性三维插值算法。线性三维插值算法主要有立方体插值算法<sup>[8]</sup>、棱镜体插值算法<sup>[9]</sup>、金字塔插值算法<sup>[10]</sup>及四面体插值算法<sup>[11]</sup>等。其中立方体插值算法的精度最高;四面体插值算法的运算量小,实现最简单。

#### 3.1 立方体插值算法

立方体插值算法又称三线插值算法,是应用最广的一种三维插值算法,插值点将其周围 8 个数据点所构成的立方体一分为八,如图 6 所示。插值点的数值为 8 个数据点以其对面子立方体的体积为权重的加权。

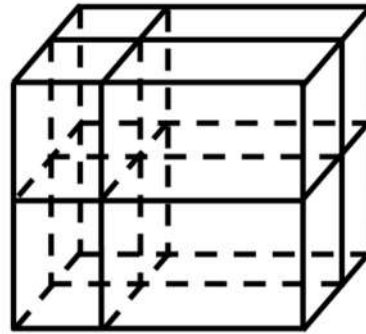


图 6 立方体插值算法示意图  
Fig. 6 Principle of cube interpolation

计算过程如式(1)所示:

$$P = \sum_{i=0}^7 \frac{v_i}{V} P_i, \text{ where } \sum_{i=0}^7 \frac{v_i}{V} = 1, \quad (1)$$

式中:  $P$  为插值点的数值,  $P_i$  为  $P$  周围 8 个数据点,  $v_i$  为  $P_i$  对面的子立方体的体积。

立方体插值算法利用了插值点周围全部的 8 个数据点,精度在几种线性插值算法中最高,但运算量也最大,一次插值过程需要读取 8 个数据点进行 16 次乘法运算。

#### 3.2 四面体插值算法

沿着插值点所在的立方体的对角轴线,将其划为 6 个四面体,插值点位于图 7 所示的四面体中,插值运算为:

$$P(x, y, z) = P_1 + x(P_2 - P_1) + y(P_3 - P_2) + z(P_4 - P_3). \quad (2)$$

四面体插值算法每次插值仅需读取 4 个数据点,进行了 3 次乘法运算,运算量比其它几种线性插值算法都小。

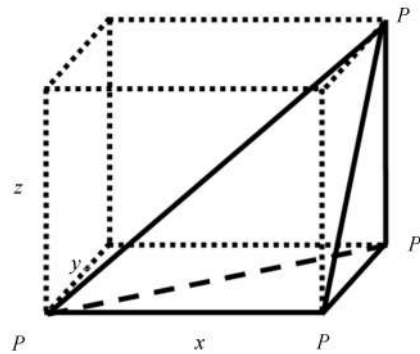


图 7 四面体插值算法示意图  
Fig. 7 Principle of tetrahedron interpolation

### 3.3 两种插值算法结果的比较

为了权衡插值算法的精度与运算量,比较了上述两种插值算法的插值精度。利用所得到的非均匀 LUT 对 2.2 章节中的测试点集,分别使用上述两种插值算法进行插值运算,比较结果如图 8 所示。

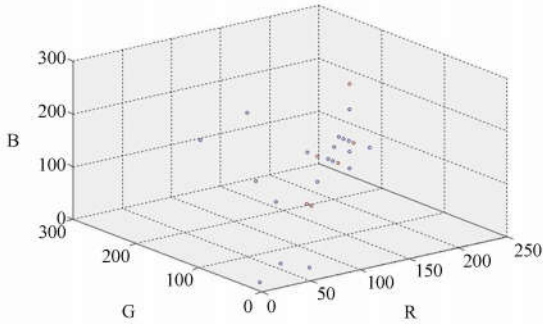


图 8 立方体插值与四面体插值结果大于 3 的误差点  
Fig. 8 Points with errors greater than 3 between cube interpolation and tetrahedron interpolation

由图 8 可知,利用立方体插值算法与四面体插值算法得到的结果误差基本在 3 个灰阶以内,说明基于第 2 章建立的非均匀 LUT,利用四面体插值算法可达到立方体插值算法的插值精度。因此,这里选用运算量更小的四面体插值算法作为色彩管理系统的插值算法。

## 4 自适应渲染功能

在 ICC 规范的色彩管理流程中,一般通过人工选择不同的渲染方式对图像进行处理,再通过反复比较选择最佳的方式对整幅图像实行同一种方式的渲染。显然该方法无法实时处理图像,且对图像中不同的内容采用同一种渲染方式不能达到最佳的视觉效果,这也是 ICC 色彩管理固有的缺陷。针对显示器动态影像对实时性的需求,本文提出了一种基于图像特征的自适应渲染方法。

根据视觉特性,人眼在低频区域,即纯色区域关注色彩的精度和彩度;而在高频区域,即色彩连续变化或彩色细节丰富的区域则关注色彩的对比度和彩色细节<sup>[12]</sup>。利用滤波算子实时划分图像的高、低频区域,在高频区域采用感知渲染方法,即色域整体压缩技术,优先保留该区域的对比度及细节;在低频区域采用相对色度渲染方法,即色域裁剪技术,优先保证色度的一致性,以达到最佳

的视觉效果。

要实现自适应渲染功能,图像的频域划分是关键。首先利用式(3)对每一像素点进行灰度化,再通过式(4)计算灰度图像的梯度,最后对梯度图像进行阈值比较实现二值化。

$$L=0.298\ 9R+0.587G+0.114B, \quad (3)$$

$$\nabla f=|G_x|+|G_y|, \quad (4)$$

其中  $G_x$  与  $G_y$  分别利用式(5)两个梯度模块卷积运算得到。

$$F_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, F_y = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

根据以上步骤利用 matlab 对图 9 中的原图进行区域划分处理,得到的二值化图像如图 10 所示。可见,在高低频区域均有部分噪声点,需要对二值化图像进行膨胀与腐蚀形态学处理。



图 9 原图像

Fig. 9 Original image



图 10 图 9 的二值化图像

Fig. 10 Binary image of Fig. 9

膨胀与腐蚀处理时所使用的结构元素的尺寸直接影响到区域划分的准确度。一般来说,结构元素越大,划分效果越好,但也会增加图像像素点的缓存数量,进而增加硬件资源的消耗。经实验,



图 11 膨胀后图像  
Fig. 11 Dilated image



图 12 腐蚀后图像  
Fig. 12 Eroded image

可分别采用  $5 \times 5$  与  $7 \times 7$  的结构元素先后进行膨胀与腐蚀处理。处理结果分别如图 11 与图 12 所示,由图可知基本消除了图 10 中的噪声点,可将图 12 作为划分图像频域的掩模板。

实现图像的高低频分区后,在两个区域分别使用不同渲染方式的 LUT 进行插值处理,从而实现了自适应渲染功能。

## 5 方法验证

### 5.1 验证系统的建立

为了验证显示器实时色彩管理方法的可行性,本文充分利用 FPGA 的高速并行运算能力,搭建了基于 FPGA 的显示器实时色彩管理硬件系统。

为满足实时性需求,系统采用流水线处理方式,整个系统的工作时钟为像素时钟。两种渲染效果的非均匀 LUT 以 ROM 形式存放于 FPGA 中,源显示器的视频信号经过解码芯片后得到相应像素点的  $R_s G_s B_s$  值,将  $R_s G_s B_s$  值作为 RGB- $RGB$  LUT 的输入,由于腐蚀处理所利用的元素大小为  $7 \times 7$ ,故需将 6 行像素的 RGB 值缓存于

双端口 RAM 中,再利用缓存数据分别进行梯度卷积运算、二值化、膨胀处理、腐蚀处理、插值运算等处理后得到相应的  $R_d G_d B_d$  值, $R_d G_d B_d$  经编码芯片输出相应的视频信号到目标显示器。

在插值运算过程中,每一个像素时钟内需要提取 LUT 中 4 个数据点进行处理。为达到该频带的要求,将每一个 LUT 存放 4 份相同的数据于不同 ROM 中,插值运算时从不同的 ROM 中分别读取 4 个数据,从而达到了“面积换取时间”的目的。由于采用了流水线工作方式,该硬件系统对分辨率为  $1920 \times 1080$  的高清视频信号进行实时色彩管理时,时钟频率为 148.5 MHz,消耗 FPGA 内存资源约为:

ROM:  $1934 \times 3 \times 16 \times 4 = 362.625$  Kbits;

RAM:  $1920 \times 24 \times 6 = 270$  Kbits。

### 5.2 色差实验

将两台不同型号的显示器分别作为源显示器与目标显示器,利用色块集测试二者在实施色彩管理前后的色差  $\Delta E_{uv}$ 。测试色块集为 RGB 各通道分别为 63, 127, 191, 255 的所有组合混合色及其 4 个灰阶的红绿蓝三纯色,共 76 种颜色。测试色块集如图 13 所示,其色坐标分布如图 14 所示。由图 14 可知,测试色块集基本均匀分布于显示器的色域中,具有较强的代表性。值得注意的是,由于色块是低频图像,系统采用相对色度的渲染方式。实验结果如图 15 所示,可见实行色彩管理后显示器之间的色差整体下降。实行色彩管理之前,两台显示器的最大色差为 14.56,平均色差为 5.08;实施色彩管理后,最大色差为 5.4,平均色差为 1.83。

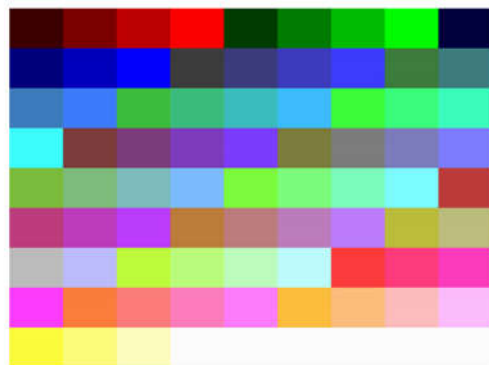


图 13 测试色块集  
Fig. 13 Test Color

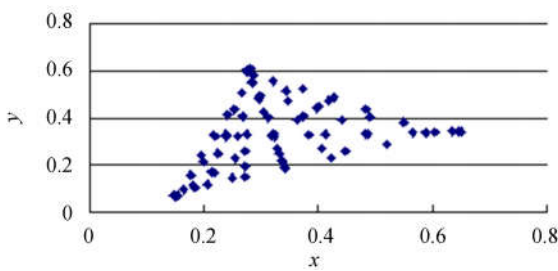


图 14 测试色块集色坐标分布

Fig. 14 Chromaticity coordinates of test colors

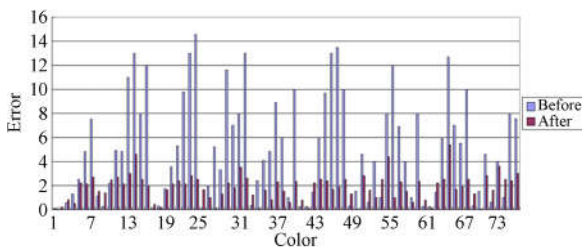


图 15 不同灰阶下的色差分布图

Fig. 15 Color errors of different gray scales

### 5.3 自适应渲染实验

将图 9 作为实验源图像,分别使用自适应渲染及相对色度渲染对其进行色彩管理。为方便对比两种渲染方式对图像细节的影响,将图像中人物的衣领部分放大,结果分别如图 16 与图 17 所



图 16 自适应渲染后图像

Fig. 16 Self-adaptive rendering image



图 17 相对色度渲染后图像

Fig. 17 Relative colorimetric rendering image

示。可见,图 16 中的细节信息比图 17 更丰富,说明采用自适应渲染功能可以更好地保留图像的细节信息。

## 6 结 论

本文针对显示器动态影像切换速度快的特点,提出了一种显示器实时色彩管理方法。基于 ICC Profile 构建非均匀 RGB-RGB LUT,一定程度上保留了 ICC 规范开放性的优点,在提高插值精度的同时减小了 LUT 的规模。使用四面体插值算法完成显示器色彩空间的转换,并通过图像灰阶梯度的阈值判断,实时施以不同的图像渲染方式,不仅能够降低色差,还保留了原图像的细节信息。实验结果表明,实行色彩管理前后,两台显示器的最大色差和平均色差分别为 14.56, 5.08 与 5.4, 1.83 $\Delta E_{uv}$  色差单位,该方法能够将显示器色差降低到人眼可接受的范围。整个系统采用流水线工作方式,充分利用 FPGA 的高速并行运算能力,满足高清分辨率下动态影像的实时性要求,并可在像素时钟下稳定运行。该系统基于硬件实现,可封装为 IP 核嵌入到一般显示系统中,摆脱了对操作系统的依赖,对色彩管理的应用具有一定的参考价值。

### 参考文献:

- [1] 陈凌云,徐海松,张显斗.基于 ICC 规范的显示设备颜色管理研究[J].光电子·激光,2008,19(3): 322-325.  
CHEN L Y, XU H S, ZHANG X D. Study on col-

- or management of color displays based on ICC specification [J]. *Chinese Journal of Optoelectronics · Laser*, 2008, 19(3): 322-325. (in Chinese)  
[2] GREEN P. *Color Management Understanding and Using ICC Profiles* [M]. UK: John Wiley & Sons, 2010: 7-17.

- [3] 李欢利,郭立红,陈涛,等. 基于 PCHIP-LMD 的虹膜识别方法[J]. 光学精密工程,2013,21(1):197-206.  
LI H L, GUO L H, CHEN T, *et al.*. Iris recognition based on PCHIP-LMD [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(1):197-206. (in Chinese)
- [4] 单宝忠,王淑岩,牛憨笨,等. Zernike 多项式拟合方法及应用[J]. 光学精密工程,2002, 10(3): 319-324.  
SHAN B ZH, WANG SH Y, NIU H B, *et al.*. Zernike polynomial fitting method and its application [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(3): 319-324. (in Chinese)
- [5] HUNG P. Color rendition using three-dimensional interpolation [C]. *Imaging Application in the Work World*, SPIE,1988,900:111-115.
- [6] RAJALA S A, TRUSSELL H J, KAKODKAR A P. The use of extrapolation in computing color look-up tables[C]. *Device-Independent Color Imaging*, SPIE,1994,2170:53-62.
- [7] LINDBLOOM B. Accurate color reproduction for computer graphics application[J]. *Computer Graphics*, 1989,23(3):117-126.
- [8] PUGSLEY P C. Image reproducing methods and apparatus:British 1369705[P]. 1974.
- [9] KANAMORI K, KOTERA H, YAMADA O, *et al.*. Fast color processor with programmable interpolation by small memory[J]. *Electron Imaging*, 1993,2(3):213-224.
- [10] FLANK P E, PAUL E. Interpolation methods and apparatus: U. S. 4334240[P]. 1982.
- [11] KASSON J M, NIN S I, PLOUFFE W, *et al.*. Performing color space conversions with three-dimensional linear interpolation[J]. *Journal of Electronic Imaging*, 1995,4(3):226-250.
- [12] KASSON J M. Color image gamut mapping system with chroma enhancement at human-insensitive spatial frequencies;U. S. 5450216[P]. 1995.

#### 作者简介:



吕国强 (1962—),男,浙江新昌人,教授,博士生导师,1983年,1986年于浙江大学分别获得学士、硕士学位,主要从事立体显示、液晶显示等方面的研究。E-mail: guoqianglv@hfut.edu.cn



梁监天(1990—),男,广西容县人,硕士研究生,主要从事成像与显示技术方面的研究。E-mail: lj499@126.com

(版权所有 未经许可 不得转载)