

基于图像色貌模型的高动态影像显示技术研究

李杰¹, 王海文², 万晓霞³

(1. 衢州职业技术学院 信息工程学院, 衢州 324000; 2. 浙江科技学院 轻工学院, 杭州 310023;

3. 武汉大学 印刷与包装系, 武汉 430079)

摘要: **目的** 研究高动态影像(HDR)在低动态范围显示设备上的高保真显示问题。**方法** 采用图像色貌模型(iCAM)设计高动态影像的再现技术框架,并使用 C++ 语言搭建软件实现系统,通过计算机测试平台对输入图片进行了实证,算法重点是处理影像的明视度。**结果** 显示图像的动态范围被拓展 10% 以上,色差小于 $1.6\Delta E_{ab}^*$,图像细节得到了加强,基本达到了高动态影像高保真显示的要求。**结论** 可利用 iCAM 框架来实现高动态影像在常规显示设备上高保真显示的问题,具有重要的理论意义与技术价值。

关键词: 图像色貌模型; iCAM; 高动态影像; 高保真显示; 色适应变换

中图分类号: TN911.73; O432.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2014)05-0112-04

High Dynamic Range Image Display Technique Based on Image Color Appearance Model

LI Jie¹, WANG Hai-wen², WAN Xiao-xia³

(1. School of Information Engineering, Quzhou College of Technology, Quzhou 324000, China;

2. School of Light Industry, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, China;

3. School of Printing and Packaging, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

ABSTRACT: **Objective** To study the high-fidelity display problem of high dynamic images (HDR) in the low dynamic range display equipment. **Methods** The image color appearance model (iCAM) was used to design the reproduction technical framework of high dynamic images and the C++ language was applied to build a software reality system. An empirical input image was actually tested by the computer platform and the image processing algorithm focused on photopic degree. **Results** The results showed that the dynamic range expansion of display image was more than 10%, the color aberration was less than $1.6\Delta E_{ab}^*$, and the image details were strengthened, basically meeting the high-fidelity display requirement of high dynamic image. **Conclusion** The iCAM framework can be used to achieve the high-fidelity display of high dynamic images in common display devices and therefore has an important theoretical and technical value.

KEY WORDS: image color appearance model; iCAM; high dynamic range image; high-fidelity display; color adaptation conversion

高动态范围影像 HDR 成像技术通过融合多幅不同曝光条件下的同一场景而成像,可获得更加真实的

场景再现^[1-3],如人眼真实观察场景一样,它对于高清影片、游戏特技、印刷输出、卫星遥感、医疗诊断等

收稿日期: 2013-11-05

基金项目: 浙江省教育厅科研计划项目(201223999);浙江省教育科学规划研究课题(SCG062);浙江省教育厅科研计划项目(Y201326661);衢州职业技术学院科研项目(QZYY1206)

作者简介: 李杰(1980—),女,山东东营人,硕士,衢州职业技术学院讲师,主要研究方向为颜色科学与技术、多媒体图像处理技术。

都具有特别重要的意义。由于当前常规显示设备(低动态范围显示设备)如 CRT, LCD 等无法对其进行高保真显示,动态范围被大大压缩,有关颜色色貌属性丢失,因此高动态影像的高保真显示是当前迫切需要解决的技术难题^[2-4]。

当前,将高动态影像在常规显示设备进行呈现,常采用色调映射方法,但该方法并未考虑色貌的影响因素^[2-6],因此丢失了图像原有的颜色信息特征。同时, CIE 推荐的图像色貌模型 iCAM 较好地表征了颜色的色貌特征,在图像颜色信息高保真输出与再现方面得到了广泛关注,尤其在变环境与变媒体条件下颜色的保真度得到了良好保证^[7-10]。由此,文中拟采用 iCAM 来实现高动态影像显示,虽然 iCAM 并不是专门针对高动态影像而设计,但其技术框架可用于高动态范围场景的再现^[11],即可以通过某些系数的调整而适应于高动态影像的处理和再现。

文中设计了基于 iCAM 的高动态影像再现技术框架,并搭建了软件试验系统,完成了高动态影像的显示和仿真。试验基本思路是:采用 iCAM 来仿真因改变照明环境人眼观看影像时色貌的变化,并将此结果模拟呈现于标准显示器上,然后对试验影像进行测试,从而模拟人眼观看影像的适应过程。该研究为高动态影像在常规显示媒体上的高保真显示提供了新的思路和方法,同时也进一步拓展了 iCAM 的应用。

1 基于 iCAM 的高动态影像再现技术框架

基于 iCAM 的高动态影像再现主要包括影像输入、设备特性化、色适应变换、局部对比/环境效应调整、IPT 转换和图像显示等 6 个步骤,基于 iCAM 的高动态范围影像再现技术框架见图 1。

1.1 影像输入

首先输入一张高动态影像,一般为浮点 RGB 图像。理想输入值可为线性 RGB, CIE XYZ, 或光谱图像,同时需要得到输入图像的路径,求出图像尺寸,为后面的计算做准备。

1.2 设备特性化

使用 D_{65} 光源下的标准 sRGB 矩阵将已线性化的 RGB 值转化为 CIE1931 XYZ 值,见式(1)。

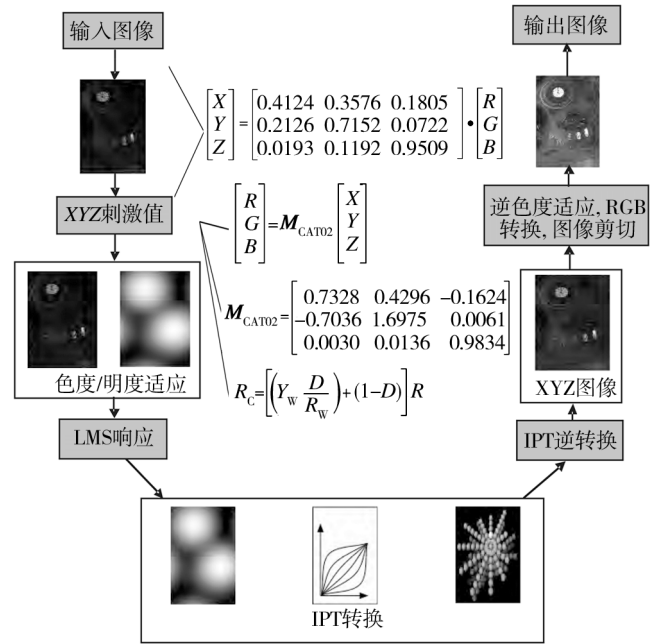


图1 基于 iCAM 的再现高动态影像再现技术框架

Fig. 1 Rendering frame of high dynamic images based on iCAM

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.4124 & 0.3576 & 0.1805 \\ 0.2126 & 0.7152 & 0.0722 \\ 0.0193 & 0.1192 & 0.9505 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (1)$$

1.3 色适应变换

将影像变成与设备无关的色度坐标,然后进行色适应处理,包括色度适应和明度适应。其目的是将高动态影像做局部化适应处理,并将影像总体的白点转换为 D_{65} 。色适应的转换与 CIECAM02 中的色适应转换相同,是一个线性沃恩克里斯转换,其中含有非完全适应的调整系数^[12-13]。此转换过程见式(2)~(4)。

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = M_{CAT02} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$M_{CAT02} = \begin{bmatrix} 0.7328 & 0.4296 & -0.1624 \\ -0.7036 & 1.6975 & 0.0061 \\ 0.0030 & 0.0136 & 0.9834 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$R_C = \left[\left(Y_w \frac{D}{R_w} \right) + (1-D) \right] R \quad (4)$$

式中: M_{CAT02} 为色适应矩阵; D 为非完全适应因子,可由式(5)确定,通常 D 在 0.1 ~ 0.4 范围内具有较好的效果。

$$D = F \cdot \{1 - (1/3.6) \cdot \exp[(-L_a - 42)/92]\} \quad (5)$$

R_w 为白点,采用影像经低频处理后的部分作为适应的白点基准,而 CIECAM02 一般以整张影像的白点为基准。 F 为色适应比例常数, L_a 为适应区域的照度,而明度适应方面则将输入改为 Y ,见式(6)。

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = M_{CAT02} \begin{bmatrix} Y \\ Y \\ Y \end{bmatrix} \quad (6)$$

另外,可加上标准 von Kries 色适应转换进行色彩平衡,如果整体色彩平衡保持不变,则用公式(6)替换公式(2)进行明度适应变换。

1.4 局部对比/环境效应调整

色度适应和明度适应只有处理部分的 HDR 色调映射。当影像经色适应处理后,需要再经一连串阶调复制曲线来处理。这些曲线是用来代表当改变影像局部反差时,环境因素和明度的结果。在 iCAM 中,环境因素则有加入局部环境因素和明度关系的对应,而适应明度 L_a 是考虑影像在低频时的 Y 值。低通图像用于计算一系列幂函数或阶调复制曲线,这些函数可采用 CIECAM02 中的环境和明度计算公式来计算^[13],见式(7)。

$$F_L = 0.2 \left(\frac{1}{5L_a + 1} \right)^2 (5L_a) + 0.1 \left[1 - \left(\frac{1}{5L_a + 1} \right)^4 \right]^2 \cdot (5L_a)^{\frac{1}{3}} \quad (7)$$

其中, F_L 在 CIECAM02 中计算, F_L 需加一个比例系数 1.0/1.7 进行调整,使得在亮度为 1000 cd/m² 时函数值为 1。在 iCAM 中使用适应明度,是考虑到影像在低频时的 Y 值。

阶调复制曲线中要考虑 2 个变量: F_L 函数(适应后的明度)标准化及模糊化的大小。事实上,改变参数大小,影像的改变非常微小,仅在阴影区比较明显。同样,增加模糊程度也会增加阴影部分的信息。

1.5 IPT 转换

IPT 矩阵将 LMS 锥状细胞信号转换至 IPT 空间^[14]。使用一种非线性指数对 LMS 函数进行调整,通常设定指数为 0.43^[12],而在 iCAM 中则基于低通图像的 Y 值进行设定。基于输入图像的亮度确定指数,从而将非线性 LMS 信号转换至 IPT 空间。

前述考虑环境因素指数的计算,是将 XYZ 三刺激值转换至 IPT 色外貌空间,即首先将 XYZ 转成 LMS

锥状细胞反应,见式(8)。

$$\begin{bmatrix} L \\ M \\ S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.4002 & 0.7075 & -0.0807 \\ -0.2280 & 1.1500 & 0.00612 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.9184 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{D_{65}} \\ Y_{D_{65}} \\ Z_{D_{65}} \end{bmatrix} \quad (8)$$

再将这些反应值经由一个非线性函数进行压缩,见式(9),其中 F_L 为考虑每一像素的系数。

$$\begin{aligned} L' &= L^{-0.43F_L} & L \geq 0 \\ L' &= -|L|^{-0.43F_L} & L \leq 0 \end{aligned} \quad (9)$$

重复公式(8)和(9)对 M,S 通道执行相同操作。若要计算明度、彩度、色相,通常将 L'M'S' 的反应值转换至 IPT 色貌空间,见式(10)。若不需求出色彩特性通道,此步骤可省略。接着将公式进行反推得到 CIE-XYZ 三刺激值,即可得到输出图像。

$$\begin{bmatrix} I \\ P \\ T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.4000 & 0.4000 & 0.2000 \\ 4.4550 & -4.8510 & 0.3960 \\ 0.0030 & 0.3572 & -1.1628 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L' \\ M' \\ S' \end{bmatrix} \quad (10)$$

1.6 图像显示

为将三刺激值 XYZ 的影像显示在屏幕上,需要反推色适应转换,从 D_{65} 到屏幕的白点。使用前述 XYZ-to-RGB 转换公式,转换后的 XYZ 值最后再转换为 RGB,结果为线性 RGB 值。最后的影像可在显示器上,分 0 ~ 255 阶显示出来。通常在分级前应用 clipping 函数对过大的亮部像素进行移除,提高影像再现效果,通常将影像数据裁切至 99%^[15],变换公式见式(11)。

$$\begin{aligned} RGB &= \frac{RGB - RGB_{\min}}{RGB_{\max} - RGB_{\min}} \\ dRGB &= 255 \cdot RGB^{\frac{1}{1.7}} \end{aligned} \quad (11)$$

2 再现系统方案与试验

2.1 再现系统程序架构

再现系统采用 C++ 语言进行实证,并以英特尔奔腾 4 处理器(1.99 GHz),内存 512 MB 的计算机作为测试平台。系统大致分为影像输入、算法处理和影像输出等 3 个部分。该系统以窗口化方式进行设计,输入部分可读入 raw,dat 及 jpg 等图像文件格式,并可由使用者自行依文件位置而选取。

该系统具有打开文件与储存文件的功能,界面设

计方便易用。算法执行完成后,影像信息以新窗口呈现让使用者容易观察。系统算法的功能分成2部分,iCAM 前导模式和反推模式,分别对图像进行色貌处理和高动态影像再现处理,其运行界面见图2。

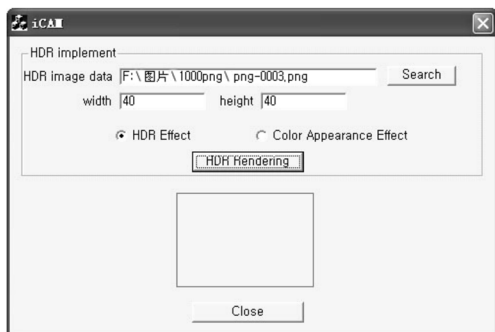


图2 运行界面

Fig. 2 Function interface

2.2 试验结果与分析

算法重点是处理影像的明视度,采用 HDR 影像格式,并依循 Reinhard 所采用的公式。对于 RGB 影像格式而言,明视度(L)可以被表示为: $L = 0.27R + 0.67G + 0.06B$ 。该算法在功能上仅处理单一影像,每次仅产生一张影像。所选取的高动态源图像以及由该系统算法执行的显示结果见图3。



a 源图像

b 显示图像

图3 图像动态范围再现前后对比

Fig. 3 Dynamic range contrast of source image and display image

由图3可以看出,图像的动态范围得到了较大拓展(经测量计算,拓展10%以上),基本达到了高动态影像特征;图像的颜色特征保持良好,颜色无明显偏色(经测量计算,色差小于 $1.6\Delta E_{ab}^*$);图像的清晰度得到提升,尤其是图像高光部分的细节得到了良好再现。由此可见,该技术框架和实现系统为高动态影像在低动态显示设备上的高保真显示提供了新的技术思路。

3 结语

高动态影像在常规显示设备上的高保真显示已成为图像与颜色科学研究的热点,并具有广泛的应用与发展前景。文中采用 iCAM 设计了高动态影像再现技术框架,并搭建了简易的软件实现系统。结果表明,该技术框架和软件实现系统比较成功地解决了高动态影像在低动态显示设备上高保真显示的问题,它拓展了图像的动态范围,基本达到了高动态范围的要求,颜色信息保持良好,图像细节得到较大提升,因此是高动态影像再现技术研究的重要创新,也是图像色貌模型深入研究和应用的典范,具有重要的理论与技术意义。

参考文献:

- [1] 万晓霞,谢德红,甘朝华,等. 基于颜色视觉的高动态范围图像压缩算法[J]. 中国印刷与包装研究,2009,1(1): 53—59.
WAN Xiao-xia, XIE De-hong, GAN Chao-hua, et al. Color Vision Based High Dynamic Image Rendering Algorithm [J]. China Printing and Packaging Study, 2009, 1(1): 53—59.
- [2] 谢德红. 高动态范围图像显示再现技术的研究[D]. 武汉:武汉大学,2010.
XIE De-hong. A Study of High Dynamic Range Images Rendition on Displays[D]. Xi'an: Wuhan University, 2010.
- [3] 朱明. 高动态范围图像高保真印刷复制研究[D]. 南京:南京林业大学,2011.
ZHU Ming. The Research on High-fidelity Reproduction of High Dynamic Range Images[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2011.
- [4] 朱明,刘真,杨丹丹. 基于局部环境亮度因子的 HDR 图像阶调压缩研究[J]. 包装工程,2011,32(9): 85—89.
ZHU Ming, LIU Zhen, YANG Dan-dan. Research on HDR Image Tone Compression Based on Luminance Factor of Local Environment[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(9): 85—89.
- [5] 谢一淞,方俊永. 高动态范围图像色调映射技术的发展与展望[J]. 照明工程学报,2011,22(5): 11—17.
XIE Yi-song, FANG Jun-yong. Development and Prospect of Tone Mapping Techniques for HDRI[J]. China Illuminating Engineering Journal, 2011, 22(5): 11—17.

- [8] SHARMA C, RUSSELL H J. Figures of Merit for Color Scanners [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(7): 428—533.
- [9] 曹从军. 色彩管理关键技术 CIE $L^*a^*b^*$ 与 CMYK 变化算法的研究 [D]. 西安: 西北大学, 2008.
- CAO Cong-jun. Color Management Key Technologies CIE $L^*a^*b^*$ and CMYK Change Algorithm Research [D]. Xi'an: Northwestern University, 2008.
- [10] KANG H R. Color Technology for Electronic Imaging Devices [M]. Washington: SPIE Optical Engineering Press, 1996.
- [11] 刘武辉, 胡更生, 王琪. 印刷色彩学 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- LIU Wu-hui, HU Geng-sheng, WANG Qi. Printing Color Science [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.
- [12] 蔡吉飞. 胶印机规范化操作与故障排除 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- CAI Ji-fei. Offset Standardized Operation and Troubleshooting of Offset Printer [M]. Beijing: Chemical Industry Publishers, 2007.
- [13] 华新星. 基于线阵 CCD 的印刷品缺陷在线检测方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- HUA Xin-xing. Based on Linear CCD Research on Defect Online Detection of Printing [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006.
- [14] 钟辉. 彩色印刷品图像缺陷自动检测系统算法的研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2005.
- ZHONG Hui. Research Color Print Image Defects Automatic Detection System Algorithm [D]. Changchun: Jilin University, 2005.
- [15] 高军, 陶娜娜, 张建. 基于数字图像处理技术的印刷品质检测系统的应用研究 [J]. 包装工程, 2006, 27(10): 111—113.
- GAO Jun, TAO Na-na, ZHANG Jian. Application of Print Quality Inspection System Based on Digital Image Processing Technology [J]. Packaging Engineering, 2006, 27(10): 111—113.

(上接第 115 页)

- [6] 杨丹丹, 刘真, 朱明. Photoshop CS3 中 HDR 图像的阶调映射算法的评价研究 [J]. 包装工程, 2010, 31(3): 101—106.
- YANG Dan-dan, LIU Zhen, ZHU Ming. Evaluation of Tone Mapping Algorithms for HDR Images in Photoshop CS3 [J]. Packaging Engineering, 2010, 31(3): 101—106.
- [7] DEVLIN K. A Review of Tone Reproduction Techniques [C]. Department of Computer Science. University of Bristol, Tech Rep CSTR-02-005, 2002.
- [8] 李金城, 刘真. 跨媒体颜色再现方法的研究 [J]. 包装工程, 2009, 30(5): 66—67.
- LI Jin-cheng, LIU Zhen. Study of Cross-media Color Reproduction [J]. Packaging Engineering, 2009, 30(5): 66—67.
- [9] 刘红芳, 赵秀萍, 金洪勇. 图像色貌模型的研究及应用 [J]. 包装工程, 2008, 29(6): 58—61.
- LIU Hong-fang, ZHAO Xiu-ping, JIN Hong-yong. Research and Application of Image Color Appearance Model [J]. Packaging Engineering, 2008, 29(6): 58—61.
- [10] 刘真, 朱明, 陈广学, 等. 基于色貌效应预测的 HDR 图像显示研究 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2011, 36(7): 871—876.
- LIU Zhen, ZHU Ming, CHEN Guang-xue, et al. Research on HDR Image Rendering Based on Image Appearance Effect Predicting [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2011, 36(7): 871—876.
- [11] FAIRCHILD M D, JOHNSON G M. Meet iCAM: An Image Color Appearance Model [C]//IS & T/SID 10th Color Imaging Conference, Scottsdale, 2002.
- [12] EBNER F, FAIRCHILD M D. Development and Testing of a Color Space (IPT) with Improved Hue Uniformity [C]//IS & T/SID 6th Color Imaging Conference, Scottsdale, 1998: 8—13.
- [13] NATHAN M, FAIRCHILD M D, HUNT R W G, et al. The CIECAM02 Color Appearance Model [C]//IS & T/SID's Tenth Color Imaging Conference, Color Science and Engineering: System Technologies and Applications, Scottsdale, 2002: 12—15.
- [14] LI Chang-jun, LUO M R, BRYAN R, et al. CMC 2000 Chromatic Adaptation Transform: CMCCAT2000 [J]. Color Research and Application, 2000, 27(1): 49—58.
- [15] KUANG J, YAMAGUCHI H, JOHNSON G M, et al. Testing HDR Image Rendering Algorithm [C]//IS & T/SID 12th Color Imaging Conf: Color Science, Systems, and Application, Scottsdale, 2004: 315—320.