

多投影面沉浸式虚拟环境系统的颜色校正

宋荆洲^{1,2}, 施法中¹, 孙汉旭², 贾庆轩¹, 高欣¹

(1. 北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100083; 2. 北京邮电大学自动化学院, 北京 100876)

摘要: 提出一种颜色校正的函数逼近优化模型来解决多投影面沉浸式虚拟环境系统的颜色校正问题。该颜色校正模型, 采用数码相机作为颜色反馈的测量仪器, 获得一个基准投影面的亮度和色度转换函数; 为其他投影面分别寻找一个亮度修正函数和色度修正函数, 使得各投影面与基准投影面的亮度和色度转换函数之间的 L2 距离最小, 进而根据各修正函数来补偿各投影机的输入响应差别以达到它们之间的颜色一致。给出了逼近校正方法的算法及其程序实现, 通过一个三通道的试验系统, 证明了此方法对解决多投影面沉浸式虚拟环境系统颜色校正问题的有效性。

关键词: 数码相机; 颜色校正; 逼近

Color Calibration of Multi-projection Immersive Virtual Environment Systems

SONG Jingzhou^{1,2}, SHI Fazhong¹, SUN Hanxu², JIA Qingxuan¹, GAO Xin¹

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083;

2. School of Automation, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876)

【Abstract】 This paper proposes a kind of function approximation optimization model to solve the color calibration problem of multi-projection immersive virtual environment systems. This color calibration model adopts a digital camera as the color feedback instrument to obtain the luminance transfer function and the chrominance transfer function of a base projection, and then finds a luminance amendment function and a chrominance amendment function for all of the other projection, which makes the L2 distances about luminance transfer function and chrominance transfer function between the based projection and the calibrated projection be minimal. It compensates the difference of projectors input response according to these amendment functions to deal with the color continuity of the display. It gives out the approximation correction algorithms and its program implementation. Using a three-channel experimental systems, it shows the method is effective for the color calibration problem of multi-projection immersive virtual environment systems.

【Key words】 Digital camera; Color calibration; Approximation

随着计算机技术的发展, 以往基于工作站或大型机已逐渐被取代, 基于PC的多投影面沉浸式虚拟环境系统, 它由多台PC驱动多台投影机而构成, 具有低成本、易扩展等特点, 成为目前国内外学者研究的热点^[1,2]。在构建此类多投影面沉浸式虚拟环境系统时, 目前主要存在两类问题: (1) 几何校正; (2) 颜色校正。其中几何校正问题经历了硬件校正、软件校正、软件自动校正的 3 个发展阶段, 目前的研究主要集中在如何快速地实现自动几何校正的研究上^[3]; 对于颜色校正, 主要有 LAM (Luminance Attenuation Map) 方法^[4]、色域匹配法^[5]和基于视觉均匀的亮度均衡法^[6], LAM 方法比较简单, 但它降低了系统的整体动态范围, 色域匹配法则很难求得多个投影机的共同色域, 基于视觉均匀的亮度均衡法计算复杂, 采用的分光仪价格昂贵, 很难推广。目前颜色的校正问题是多投影面系统构建中的一个难题。

本文采用基于颜色校正的函数逼近优化模型, 给出了亮度和色度的逼近校正方法, 舍弃了 LAM 方法和基于视觉均匀的亮度均衡法只考虑亮度匹配的做法, 同时也避免了色域匹配法直接在三维色域上进行颜色匹配带来的高求解难度, 通过校正实验获得了比较满意的效果, 对提高多投影面虚拟环境系统的画面颜色整体一致性、增强多投影面图像的显示质量、增强虚拟环境系统的沉浸感应有很强的实际应用价值。

1 颜色校正模型的建立

假设一个多投影面沉浸式虚拟环境系统的显示区 D 由 j 台投影机的显示而构成, 每台投影机记为 P_j , $1 \leq j \leq n$ 。设显示区 D 内点的坐标为 (x, y) , 各投影面内点的坐标为 (x_j, y_j) 。设用来测量反馈显示区颜色的相机平面 C 内点的坐标为 (x_c, y_c) 。颜色校正的目标是对于任一给定的投影输入 $i=(i_r, i_g, i_b)$, 使得整个显示区的各个投影面之间的颜色在视觉上达到一致, 包括亮度和色度的一致, 即要求满足以下关系:

$$\text{Lum}(D_j(x, y, i)) = \text{Lum}(D_k(x, y, i)) \quad (1)$$

$$\text{Chr}(D_j(x, y, i)) = \text{Chr}(D_k(x, y, i)) \quad (2)$$

$$\forall j, k \in \{1, \dots, n\}, j \neq k$$

其中, $\text{Lum}()$ 和 $\text{Chr}()$ 分别表示各投影机的亮度转换函数和色度转换函数。

但是, 由于目前投影机制造工艺水平的限制, 即使是相同品牌、相同型号的投影机, 它们对给定输入的响应也很难

基金项目: 2006 北京市自然科学基金资助项目(3062014); 2005 新世纪优秀人才支持计划基金资助项目(NECT-05-0115)

作者简介: 宋荆洲(1976 -), 男, 博士生, 研究方向: 虚拟现实技术, 计算机图形学等; 施法中, 硕士、教授; 孙汉旭、贾庆轩, 博士、教授; 高欣, 博士生

收稿日期: 2006-06-13 **E-mail:** redandblack_7@163.com

满足式(1)、式(2)。为此,本文采用函数之间的逼近方法来建立颜色校正算法的数学模型,该模型是一个数学优化问题,它将式(1)、式(2)转化为一个优化问题来进行求解,从而获得尽可能满意的校正效果。

该校正模型可以描述如下:任取一投影机 P_r 的投影面作为参考投影面,颜色校正目标可转化为寻求修正函数 G_k 、 H_k 分别使得 $Lum(D_k(x,y,i)) \cdot G_k(i)$ 与 $Lum(D_r(x,y,i))$ 之间、 $Chr(D_k(x,y,i)) \cdot H_k(i)$ 与 $Chr(D_r(x,y,i))$ 之间的L2距离最小。令

$$E_k(i) = Lum(D_k(x,y,i)) \cdot G_k(i)$$

$$E_r(i) = Lum(D_r(x,y,i))$$

$$F_k(i) = Chr(D_k(x,y,i)) \cdot H_k(i)$$

$$F_r(i) = Chr(D_r(x,y,i))$$

根据数学上L2距离的定义,问题的描述可以简化为

$$\min \left\{ \sqrt{\int_a^b E_k(i) \cdot E_r(i) di} \right\} \quad (3)$$

$$\min \left\{ \sqrt{\int_a^b F_k(i) \cdot F_r(i) di} \right\} \quad (4)$$

2 校正过程的实现

2.1 输入域和空间域的采样

如第1节所述,校正的目的是寻求 G_k 、 H_k 使得对任意的给定输入 i ,在整个显示区 $D(x,y)$ 上满足式(3)式(4),但是,如果不对 i 和 D 的取值进行采样,我们将无法进行实时的在线校正。

(1)输入域的采样。对于24位的颜色显示模式而言, i 的输入有 2^{24} 种取值,为了减小校正计算量,必须对输入域进行采样。本文对R、G、B这3个颜色通道的输入 i_r, i_g, i_b 分别以16为增量进行取值,即0,16,32,48,96,112,128,144,160,176,192,208,224,240,255。为了提高颜色校正的效果,在实际构造 G_k 、 H_k 时,再利用样条函数对采样输入点的响应值在[0 255]上进行插值。

(2)空间域的采样。在多投影面沉浸式虚拟环境系统中,每个投影面的显示分辨率一般为 1024×768 。显然,对于显示区的任何一个投影面 $D_f(x,y)$ 也无法实现针对每个像素点 (x,y) 来计算生成 G_k 、 H_k 。本文在利用相机进行实时颜色校正匹配时,让用户通过校正程序利用鼠标直接在需要进行颜色匹配的两个相邻投影面上进行区域采样。用户可以拖动矩形区域采样框的两个对角顶点,选取位于相机观察范围内的颜色效果最好的一个采样区域 $S, S \subset \{(x,y) | 0 < x < width, 0 < y < height\}$ 。

2.2 颜色转换函数的测定

本文利用相机测量各投影机在采样输入域和空间域上的响应值,利用获得的数据值生成各投影机的亮度转换函数 $Lum()$ 和色度转换函数 $Chr()$ 。首先,利用高动态范围成像技术^[7]来测量投影机输入 i 在相机平面内的颜色像素值RGB,然后通过NTSC RGB颜色模型到CIEXYZ颜色体系的转换关系,得到相应输入的亮度和色度值,具体的转换方法如下:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.607 & 0.174 & 0.201 \\ 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ 0.000 & 0.066 & 1.117 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

由上式可得亮度 $Y=0.299R+0.587G+0.114B$,色度坐标 (s,t) 可分别由以下两式计算获得:

$$s = \frac{X}{X+Y+Z}, \quad t = \frac{Y}{X+Y+Z}$$

2.3 校正过程

在校正的过程中,本文先进行各投影机之间的色度匹配校正,然后再进行亮度的匹配校正。

(1)色度匹配校正

1)任选一投影机 P_r 作为基准参考投影机,按输入域采样点先后连续输入 i_r, i_g, i_b 这3组单通道的颜色输入值,这样每组输入值有15种,共有45种输入值,用一台相机观察并返回 P_r 对各输入的色度响应值 $Chr(D_r(x,y,i))$,并以此计算 P_r 的色度响应转换函数;

2)对与 P_r 相邻的投影机 P_k ,以 P_r 的色度响应转换函数为基准,以式(4)为目标,求得每个数据点上函数 H_k 的值,使得 P_k 的 F_k 向 F_r 逼近,再通过插值计算获得修正函数 H_k ;

3)按1)、2)对其他所有相邻通道投影机进行色度响应函数的逼近匹配,并得到各自的修正函数 H ;

(2)亮度匹配校正

1)仍以投影机 P_r 作为基准参考投影机,按输入域采样点先后连续输入 (i_r, i_g, i_b) 15组三通道分量值相同的颜色输入值,用一台相机观察并返回 P_r 对各输入的亮度响应值 $Lum(D_r(x,y,i))$,并以此计算 P_r 的亮度响应转换函数;

2)对与 P_r 相邻的投影机 P_k ,以 P_r 的亮度响应函数曲线为基准,以式(3)为目标,求得每个数据点上函数 G_k 的值,使得 P_k 的 E_k 向 E_r 逼近,再通过插值计算获得修正函数 G_k ;

3)按1)、2)对其他所有相邻通道投影机进行色度响应函数的逼近匹配,并得到各自的修正函数 G 。

2.4 算法的程序实现

在得到各被校正投影机的 G_k 、 H_k 函数以后,本文通过修改每台投影机的输入 i 来加载实现 G_k 、 H_k 函数的功能作用,从而最终实现对各投影面的颜色校正。

目前最新的大多数商业图形卡(如nVIDIA NV20及以上档次显卡等)在OpengGL扩展函数库的支持下,已能够提供基于图形处理器(GPU)的实时的顶点编程和片断编程功能。因此将 G_k 、 H_k 函数对 i 的映射作用转化为直接对像素的多纹理操作,这样大大减小了CPU的运算量,保证了校正算法实现的实时性。算法的程序实现过程伪代码如下:

```

...
RenderScene(); //绘制场景
    glActiveTextureARB(GL_TEXTURE0_ARB);
    //激活与函数 $H_k$ 对应的纹理0
    glBindTexture(GL_TEXTURE_2D,texture0);
    //绑定纹理0
    glActiveTextureARB(GL_TEXTURE1_ARB);
    //激活与函数 $G_k$ 对应的纹理1
    glBindTexture(GL_TEXTURE_2D,texture1);
    //绑定纹理1
    glCopyTexSubImage2D(...);
    //拷贝帧缓存中的数据到纹理内存
    glMultiTexCoord2fARB(GL_TEXTURE0_ARB,...); //利用多纹理
//加载函数 $H_k$ 
    glMultiTexCoord2fARB(GL_TEXTURE1_ARB,...); //利用多纹理
//加载函数 $G_k$ 
    GeometricWarp(); //几何校正
    SwapBuffers();
...

```

如上面的伪代码所示,算法的程序实现过程为:(1)每个绘制服务器按正常图形流水线绘制场景;(2)将帧缓存中的数据拷贝出来用作下一步的多纹理的颜色校正;(3)利用多纹理映射方法加载 G_k 、 H_k 函数的作用;(4)将多纹理映射后的颜色校正结果绘制到经过几何校正后的模型表面上,得到正确的颜色校正效果。

3 实验及结果

本文以由 3 个投影面构成的多投影面沉浸式虚拟环境系统为例对本文提出的算法进行了实验验证, 3 个以上的投影面构成的投影系统的构建很容易从由 3 个投影面组成的投影系统扩展而成, 其中的颜色校正问题也可以采用与之相同的办法来解决。

该实验系统硬件部分由 4 台 PC 机、3 台 NEC 1065+投影机(显示分辨率为 XGA1024×768)、1 块 CG300 大恒图像采集卡、1 台 Sony 数码相机组成。其中 1 台 PC 负责接收应用程序的客户输入, 另外 3 台分别驱动 1 台投影机, PC 机之间通过 100Mbps 以太网连接。PC 机的配置为 P4 2.4GHz CPU, 512MB 内存; 显卡/图形加速卡: NVidia Quadro4 750 XGL, 显存 128MB。软件部分的组成为: Windows2000 操作系统, 底层支持软件分别为自行研发的 Autocali 多投影面显示系统及演示用的飞行驾驶应用程序。

系统在一个环形屏幕上进行了颜色校正实验, 实验结果如图 1 所示。

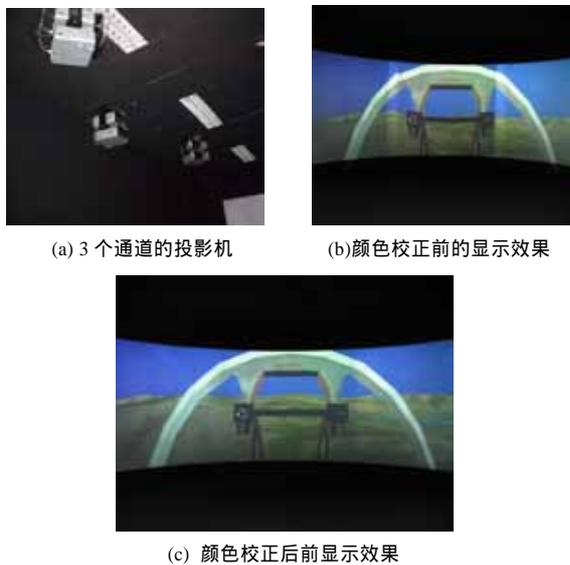


图 1 颜色校正实验结果

(上接第 164 页)

5-flod 交叉验证, 测试结果如表 2, 其中反对一行、支持一行和全部一行各表示反对类别、支持类别和两类样本在一起的分类型准确率。

表 2 态度分类实验结果

	A 类	B 类
反对	0.85	0.966
支持	0.998	0.985
全部	0.954	0.968

4 总结

文本分类是个相对成熟的技术, 具有比较好的性能, 本文介绍了一种基于文本分类技术的文本过滤算法, 该算法把基于 VSM 的主题分类算法与文本态度分类结合起来。实验结果表明, 该方法具有较高的精度和召回率, 该系统在实际应用中也取得了很好的效果。但是我们现在的系统仅采用统计的方法, 进一步的工作将会尝试结合一些浅层次的语法分析工具和知识库以提高主题分类和态度分类的性能。

其中, 图 1(a)是 3 个通道的投影机, 图 1(b)是进行颜色校正之前的系统运行效果, 图 1(c)给出了系统进行颜色校正之后的运行效果。对比图 1(b)、图 1(c)可以看出, 经过颜色校正后, 系统各投影面之间的颜色一致性得到了明显增强。

4 结论

本文提出了一种用于解决多投影面沉浸式虚拟环境系统的颜色校正问题的函数逼近优化模型, 它通过相机来获取颜色反馈信息, 并自动实现对各投影面之间的亮度、色度的匹配校正。实验证明, 该方法可以在快速构建多投影面沉浸式虚拟环境系统时获得满意的颜色校正效果。需要进一步研究的问题包括: 颜色校正的客观评价机制、大规模多投影面系统的快速颜色校正问题等。

参考文献

- 1 Brown M, Majumder A, Yang R. Camera-based Calibration Techniques for Seamless Multiprojector Displays[J]. IEEE Transaction on Visualization and Computer Graphics, 2005, 11(2): 193-206.
- 2 Staadt O. A Survey and Performance Analysis of Software Platforms for Interactive Cluster-based Multi-screen Rendering[C]. Proceedings of the 7th International Workshop on Virtual Environments, New York, 2003: 261-270.
- 3 Brow M S. Low-cost and Easily Constructed Large Format Display System[Z]. 2006-01-14. <http://www.cs.ust.hk/~brown/tr/tr-01-02.pdf>.
- 4 Majumder A, Stevens R. LAM: Luminance Attenuation Map for Photometric Uniformity in Projection Based Displays[C]. Proceedings of ACM Virtual Reality and Software Technology, HongKong, 2002: 147-154.
- 5 Wallace G, Chen H, Li K. Color Gamut Matching for Tiled Display Walls[C]. Proceedings of Immersive Projection Technology and Virtual Environments, Zurich, 2003: 293-302.
- 6 Majumder A. A Practical Framework to Achieve Perceptually Seamless Multi-projector Displays[D]. North Carolina: University of North Carolina at Chapel Hill, 2003.
- 7 Debevec P E, Malik J. Recovering High Dynamic Range Radiance Maps from Photographs[C]. Proceedings of ACM Siggraph, Los Angelse, 1997: 369-378.

参考文献

- 1 黄萱菁, 吴立德. 基于向量空间模型的文本过滤系统[J]. 软件学报, 2003, 14(3).
- 2 Burges C. A Tutorial on Support Vector Machines for Pattern Recognition[M]. Data Mining and Knowledge Discovery, Boston: Kluwer, 1998.
- 3 Joachims T. Text Categorization with Support Vector Machines: Learning with Many Relevant Features[C]. Proc. of European Conference on Machine Learning, 1998.
- 4 Pang B, Lee L, Vaithyanathan S. Thumps Up? Sentiment Classification Using Machine Learning Techniques[C]. Proceedings of the Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing, Philadelphia, Pennsylvania, 2002.
- 5 Yang Y, Liu X. A Re-examination of Text Categorization Methods[C]. Proceedings of the 22th ACM International Conference on Research and Development in Information Retrieval, 1999: 42-49.