

多投影仪无缝拼接显示中的颜色校正 技术比较研究

吕 品^{1),2)} 张金芳¹⁾ 王宇心¹⁾

¹⁾ (中国科学院软件研究所综合信息系统技术国家重点实验室, 北京 100190)

²⁾ (中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要 基于多投影仪的无缝拼接显示是对图形、图像、视频等进行大范围、高分辨率显示的一种有效实现方式。多投影仪无缝拼接显示的一个关键是解决颜色失调问题,而现有的颜色失调原因的分析结果可归纳为投影仪输出颜色的变化特性和投影屏幕与投影环境的影响两个方面。近年来,为解决该问题已提出了多种颜色校正技术,而根据解决颜色失调问题的原理和实现方法的不同,这些技术可分为基于边缘融合的校正技术、基于单一投影光源的校正技术和基于颜色/亮度输出匹配的校正技术3类,并对这3类技术在无缝拼接显示效果、可维护性和可扩展性等方面的优缺点进行了较详细分析,该领域下一步的研究将会朝着兼顾不同投影机类型、不同形状和反射特性的投影屏幕和考虑运动中观察者的实时颜色校正方向发展。

关键词 多投影仪 无缝拼接显示 颜色校正 色彩一致

中图法分类号: TP391.41 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2008)07-1272-09

A Comparative Research of Photometric Calibration Techniques in Seamless Multi-projector Display

LV Pin^{1),2)}, ZHANG Jin-fang¹⁾, WANG Yu-xin¹⁾

¹⁾ (National Key Laboratory of Integrated Information System Technology, Institute of Software, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

²⁾ (Graduate University, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract The seamless tiled display that is based on the multi-projector is an effective realization for the wide field and high-resolution display of graph, image, video and so on. The key problem for the seamless tiled display is the solution of color maladjustment. The existing analysis result of the reason for color maladjustment includes two parts, one is the variation characteristic of the projector's color output, and the other is the effect of the projecting screen and environment. So many photometric calibration techniques are proposed in recent years, and there are three types in sum which include edge blending based calibration technique, single projector light based calibration technique and gamut output matching based calibration technique according to the principle and implement method of the solution for color maladjustment problem. We compare the advantage and disadvantage of these three techniques in the seamless display effect, maintainability, expansibility and other aspects. The future of this field is the real-time photometric calibration considering different type of projector, different shape and reflecting characteristic of display screen and moveable observer.

Keywords multi-projectors, seamless tiled display, photometric calibration, color uniformity

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2005AA121120); 中国科学院知识创新工程项目(5206020)

收稿日期: 2006-06-05; 改回日期: 2007-01-12

第一作者简介: 吕 品(1982 ~), 男。2004 年于电子科技大学获工学学士和文学学士学位, 现为中国科学院软件研究所博士研究生。

主要研究方向为数字视频、虚拟现实与系统仿真技术。E-mail: lupinyy@263.net

1 引言

随着虚拟现实、科学可视化、仿真训练、家庭剧场等应用日益广泛,对图形、图像、视频的大范围和高分辨率显示的需求也越来越强烈,同时也促使这方面的研究不断地走向深入^[1,2]。受限于传统显示硬件(CRT, LCD 显示器)的工艺水平,不能生产出显示面积为十几甚至几十平方米的单一显示设备。然而,由于各种商用投影设备的显示性能大幅度提高,而价格却在不断下降,因此,越来越多的研究机构和研究者开始研究基于多投影仪的无缝拼接显示技术,其目的是通过投影仪阵列投影来实现大范围的、高分辨率的无缝显示。

实现大范围、高分辨率显示的前提是待显示数据的实时生成以及合理、有效的分配,文献[3]~[6]在数据驱动,数据分配和负载平衡等方面做了深入的研究,并在此基础上,使用显示设备将数据显示出来。早期的显示系统采用的是硬拼的方法,即将多个显示设备(CRT, LCD)按照位置关系组合起来进行显示。这样虽然能够得到范围比较大的高分辨率显示效果,但是由于每个显示单元之间存在着不能消除的接缝,从而严重影响显示效果。目前的基于多投影仪的显示系统是使用多个投影显示设备,将显示图像按照位置关系进行软边拼接来生成无缝的显示效果。为实现此目的,需要解决投影图像的几何失真和颜色(本文所指颜色主要指亮度)失调两个关键性问题^[7]。对于前者,可以通过比较成熟的几何校正算法来解决^[8~12],这些算法主要是处理显示图像的几何一致性问题,例如一条经过多个投影仪显示区域的直线应该仍然保持平直等等;而对于后者,由于造成颜色失调的原因较多,也比较复杂,特别是对于大规模的无缝拼接显示(大于4个投影仪的投影阵列),该问题是制约产品化的一个瓶颈,因此成为最近几年的一个研究热点。

如今,国内对该领域的研究还处于开始阶段,构建的显示系统规模还比较小(一般由2~3台投影仪组成),并且大部分设备依靠进口。发表在国内外学术刊物上的研究报道也比较少,研究的侧重点还只是解决投影图像的几何失真问题^[7,8,13],对色彩校正的研究工作也才刚刚展开^[14~16]。本文在总结、归纳现有颜色失调原因分析结果的基础

上,首先讨论了近年来国际上为解决该问题所研究的多种颜色校正技术,并对这些技术的优缺点进行了比较分析,最后对该领域今后的研究发展方向进行了展望。

2 颜色失调原因

针对基于多投影仪的无缝拼接显示中的颜色失调问题,Majumder, Stone 和 Yang 等人从不同方面进行了分析^[12,17~22],通过总结他们的分析结果可以把造成颜色失调的原因归纳为:投影仪输出颜色的变化特性和投影屏幕与投影环境的影响两个方面。

2.1 投影仪输出颜色的变化特性

投影仪输出图像的颜色变化特性侧重于讨论投影仪自身输出图像的整体差异。具体又可以分为投影仪输出颜色的时间变化特性和空间变化特性两种。

2.1.1 投影仪输出颜色的时间变化特性

随着投影仪灯泡使用时间的增长,对应于相同的像素位置和相同的 R, G, B 输入值,投影仪输出的颜色会随时间发生改变,这称之为投影仪输出颜色的时间变化特性^[18]。文献[17]的实验表明,使用200小时的投影仪其单通道的颜色亮度输出强度比刚开始使用时平均减少了35%。对于由多个投影仪构成的无缝拼接显示系统来说,由于每个投影仪的输出颜色的时间变化特性都不一样,因而造成随系统使用时间的增长,颜色失调现象越来越明显。

2.1.2 投影仪输出颜色的空间变化特性

造成多投影仪的无缝拼接显示中的颜色失调问题最重要的原因是投影仪输出图像颜色的空间变化特性。按颜色变化发生的空间位置不同,具体又可以分为输出颜色的帧内变化(intra variation)、输出颜色的帧间变化(inter variation)和输出颜色的重叠区变化(overlap variation)3种^[17~19,22]。

(1) 输出颜色的帧内变化

文献[17]中指出,单一投影仪的投影图像,其亮度从中心到边缘有40%~80%的衰减,而相应的其色度在整个投影区域内则基本保持不变(如图1(a)所示)。这种现象是由于投影区域内某像素的亮度随该点到投影仪镜头中心点的距离增大而减小所致。由于投影图像的中心点到投影仪的镜头中心

距离最短,因此该点的像素亮度最大;类似的,由于投影图像边界的像素点到投影仪镜头中心的距离最长,因此这些点的像素亮度也最小。同时,投影仪和投影屏幕之间的夹角变化也会导致投影图像亮度的不均匀衰减。

(2)输出颜色的帧间变化

如图 1(b)所示,无缝拼接投影系统中,不同投影仪的投影图像之间也存在着颜色差别(指亮度差别),称之为输出颜色的帧间变化^[17,18]。这主要是由于不同投影仪的投影输出特性,以及不同投影仪的放置位置和投影方向的不同造成的。另外,不同投影仪的各种投影参数的设置,例如亮度、对比度和缩放的不同等等因素也是造成输出颜色的帧间

变化的原因。文献[21]中指出,对于相同型号的投影仪来说,相对于输出颜色的亮度的帧间变化,其色度的帧间变化可以忽略不计。

(3)输出颜色的重叠区变化

无缝拼接系统的重叠区定义为多个投影仪投影图像的重叠范围。由于在这个区域内,所有像素的亮度值是由多个投影仪在该位置的投影光亮度交叠而成的,因而形成了一个高亮区(如图 1(c)所示),明显区别于相邻的非重叠区的亮度。对于相同型号的投影仪形成的重叠区,其色度与相邻的非重叠区的色度相差不大。但是对于不同型号投影仪来说,重叠区的像素亮度和色度与非重叠区均不相同^[21]。



图 1 投影仪输出颜色的空间变化特性
Fig. 1 Spatial color variation of projector

2.2 投影屏幕和投影环境的影响

影响输出图像颜色变化的客观原因是投影屏幕的非兰伯特特性 (non-lambertian),这是导致空间中不同位置的观察者看到一幅图像内相同位置的像素亮度不同的主要原因^[20],特别是对于后向投影显示系统,这种亮度不同现象更加明显。另外,投影环境也会对投影输出图像的颜色变化产生影响,例如环境光的强度,颜色等等。

3 颜色校正技术

针对上述两种造成颜色失调的原因,近几年来,许多研究机构和研究者着手研究各种颜色校正技术,目的是补偿或消除由颜色失调对多投影仪无缝拼接显示所造成的影响。根据现有的各种技术解决颜色失调问题的原理和实现方法的不同,可以分为以下 3 种:基于边缘融合的校正技术、基于单一投影光源的校正技术和基于颜色/亮度输出匹配的校正技术。

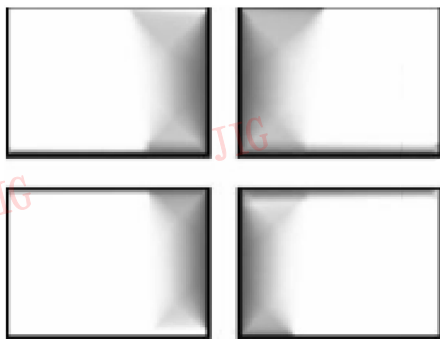
3.1 基于边缘融合的校正技术

最初阶段的多投影仪投影输出的无缝拼接显示颜色校正技术的侧重点是解决投影仪之间投影输出重叠区的亮度增加问题。考虑到造成投影输出重叠区域亮度增加的原因是由于多个投影仪在投影输出重叠区域投影光的叠加,因此可以通过减少每个投影仪在投影输出重叠区域内投影光的强度来解决。例如,考虑一个处于两个投影仪 P_1 和 P_2 投影输出重叠区域的像素点 x ,该像素点的亮度 $I(x)$ 来自于两个投影仪的贡献之和。设两个投影仪在该点能够投出的亮度为 $I_{p_1}(x)$ 和 $I_{p_2}(x)$,则满足式(1)的投影输出重叠区的所有像素点均可以达到与非重叠区相一致的亮度。

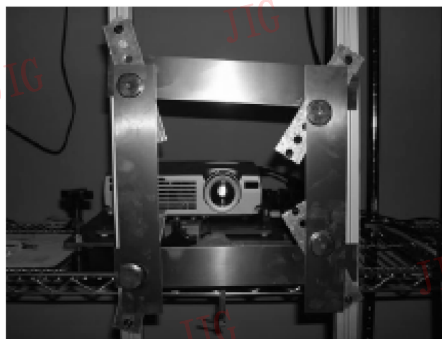
$$I(x) = a_1(x)I_{p_1}(x) + a_2(x)I_{p_2}(x) \tag{1}$$

其中, $a_1(x) + a_2(x) = 1$, 且 $0 \leq a_1(x), a_2(x) \leq 1$ 。函数 $a(x)$ 比较典型的有线性函数、余弦函数和指数函数等。进而可以将上述原理推广到解决多个投影仪的投影输出重叠区间的亮边问题。

基于上述原理的颜色校正技术则称为边缘融合技术。该技术的具体实现方法又分为软件实现和硬件实现两种。其中软件实现方法是通过修改对应于每个投影仪的图像帧缓存的 alpha 通道的数值来达到改变投影仪投影输出重叠区间的投影光亮度的目的



(a) 边缘融合校正技术的软件实现



(b) 边缘融合校正技术的硬件实现

图2 边缘融合校正技术的两种实现方法

Fig. 2 Two-implementation methods of edge blending

3.2 基于单一投影光源的校正技术

基于边缘融合的校正技术主要考虑的是解决多投影仪输出的重叠区颜色变化问题。随着无缝拼接显示系统使用时间的增长,另一个重要因素——投影仪输出颜色的时间变化特性对显示颜色失调影响也越来越显著,而这是基于边缘融合的校正技术所不能解决的。鉴于此,文献[26]、[27]提出了一种基于单一投影光源的校正技术。通常情况下,因为每个投影仪的驱动光源是独立的,所以它们的特性均存在不同程度的差异。当显示系统建立之初,这种差异可能还不明显,但是随使用时间的增长,这种差异会逐渐积累,从而导致每个投影仪在相同输入的条件下,输出的颜色发生失调。因此,一个直观的解决办法就是统一所有投影仪的驱动光源。

具体的实现方法是先对无缝拼接显示系统中的所有投影仪使用一个灯泡产生驱动光源;然后由该光源产生的光,再通过光纤分配器和多条光纤分别送到每个投影仪的投影显示系统作为驱动光源。由于每个投影仪的驱动光源都相同,并且随投影系统使用时间的变化而同步变化,因此投影出来的色彩也就能保持一致,而且不随时间变化而变得不一致。另外,在投影系统的输出端,采用了由费聂耳平铺光学镜头组成的硬件掩模系统,用来解决重叠区亮度增加的问题。上述两点的结合,较好地解决了无缝

的^[10,12](如图2(a)所示)。硬件实现方法又可以分为以下两种,一种是在投影仪镜头边沿放置物理掩模^[23],另一种是在投影光的通路上放置光学掩模^[24,25](见图2(b)),两种方法都能够实现改变投影仪在投影输出重叠区间的投影光亮度的目的。

拼接显示系统的颜色失调问题。

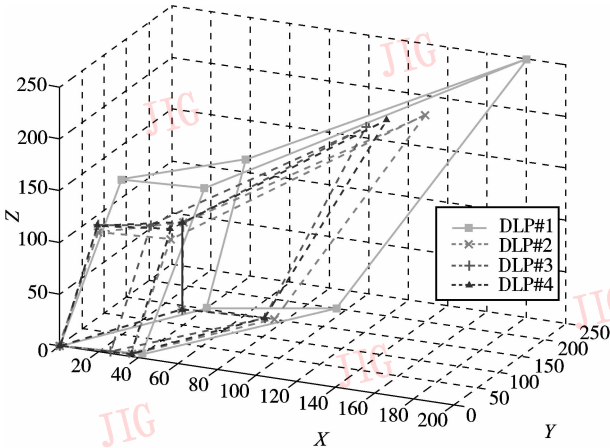
3.3 基于颜色/亮度输出匹配的校正技术

基于单一光源的校正技术虽然较好地解决了不同投影仪投影图像的颜色不一致现象,但是由于受制于单一驱动光源的功率和散热问题,目前最多只能支持9个投影仪,并且该技术并不能解决颜色输出的帧内变化问题,因此不适用于十几个甚至几十个投影仪构成的更大规模的无缝拼接显示系统。针对这种情况,文献[20]、[21]、[28]、[29]提出了基于匹配所有投影仪颜色输出的色彩校正技术,并对其进行了深入研究。这一技术的理论基础是,在CIE-XYZ颜色空间内,每个投影仪都具有各自不同的、独立的颜色输出范围(gamut output)。而通过获得每个投影仪的颜色输出范围,即可先得到一个公共的颜色输出范围,再通过修正投影仪的颜色查找表或修改送入投影仪的输入图像的像素值来达到直接或间接地匹配所有投影仪的颜色输出范围的目的。这样,经过校正后的投影仪,其输出的颜色无论是在帧内,还是在帧间就一致了。再结合3.1节讨论的技术就能彻底解决多投影仪无缝拼接显示的彩色失调问题。

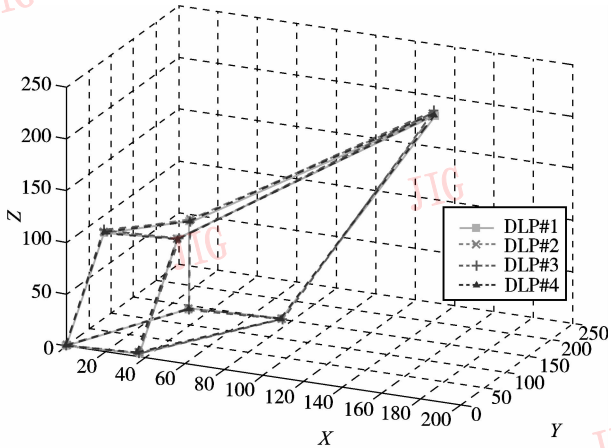
其实现过程分为以下3步:(1)首先通过点光线测量设备(例如色度仪,分光度辐射计)在一个固定位置(通常为投影屏幕的正前方)测量每个投影仪的颜色输出范围(图3(a));(2)进行颜色输出空间的匹

配,其目的是求得所有投影仪的公共颜色输出空间(图 3(b)),并在假设所有投影仪都是线性设备的前提下,计算在 XYZ 颜色空间中每个投影仪从各自颜色输出范围到公共颜色输出范围的 3 维线性变换;(3)根据上一步得到的变换关系进行匹配校正,具体可以通过重新设置投影仪内部的颜色查找表以及修改送入投影仪的图像像素值来实现。这种技术使用

的前提是,硬件设备的颜色输出是可以由基色的线性组合来表达的^[30]。LCD 投影仪可以满足上述要求,但对于 DLP 投影仪来说,这个方法不适用。为此,对于由不同型号投影仪构成的无缝拼接系统,Wallace 在文献[20]和文献[21]的研究基础上,提出了一种改进的颜色输出匹配校正方法^[29],使多型号投影仪之间的输出颜色差异减少到 1.47%。



(a) 匹配前的投影仪色彩输出范围



(b) 匹配后的投影仪色彩输出范围

图 3 4 个投影仪的颜色输出匹配前后的色彩输出范围比较

Fig. 3 The comparison of gammut output before and after matching for four projectors

文献[10]、[28]、[31]基于人眼的对亮度变化比色度变化敏感的视觉特性^[30,32],讨论了一种匹配投影仪颜色输出空间中亮度分量的色彩校正方法。该方法只匹配颜色输出的亮度分量,而不处理与之对应的色度分量。区别于颜色输出匹配校正技术中使用的点光线测量设备,在亮度输出匹配方法中使用的是数码照相机。和色度仪相比,尽管数码相机的色彩输出范围比较窄,但是由于它可以通过调整曝光时间获得范围很宽的亮度输出范围^[33],因此十分适用于基于亮度输出匹配的校正方法。该方法具体分为——标定和图像校正两个过程。在标定过程中,首先使用照相机获得每个投影仪的投影图像,并根据文献[34]~[36]提供的方法得到照相机坐标系中的像素,同时确定显示坐标系中的像素与投影仪坐标系内的像素之间的映射关系;然后使用照相机在相同的位置获得每个投影仪 P_j 的 3 个通道在输入亮度最大时所投出的 3 幅投影图像;最后使用这些图像按照前面得到的像素影射关系求出每台投影仪的亮度响应函数 L_{P_j} ,进而求出由所有投影仪构成的全景显示的亮度响应函数 L_D 。按照式(2)从 L_D 中就可以得到对于全景图像中每个像素的公共亮度响应,即把整个投影显示区内亮度最低的像素

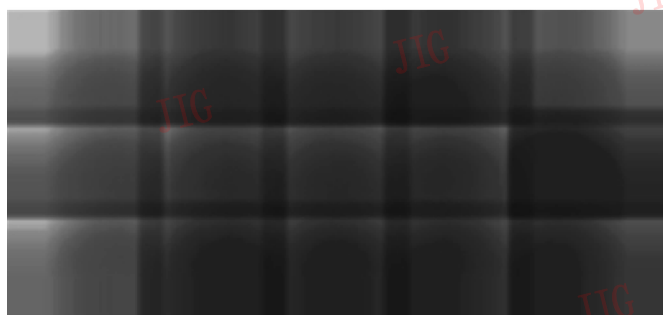
的亮度响应作为公共亮度响应。

$$L_{\min} = \min(x_d, y_d) L_D \quad (2)$$

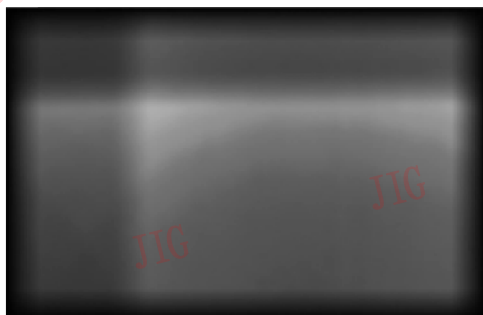
为了使整个投影显示区域内像素的亮度响应都等于得到的这个公共亮度响应,进而生成一幅由对应每个像素的衰减因子构成的亮度衰减图(luminance attenmuation map, LAM),衰减的定义如下(结果如图 4(a)所示):

$$A_D(x_d, y_d) = L_{\min} L_D(x_d, y_d) \quad (3)$$

最后通过像素之间的映射关系来得到每个投影仪各自的亮度衰减图(如图 4(b)所示)。通常使用照相机进行标定的过程是假设投影仪存在线性的亮度输出响应,由于投影仪的输出颜色特性,导致这种假设在实际情况中并不存在,因此,需要估计投影仪每个色彩通道的强度转移函数(intensity transfer function, ITF)。该函数可以通过色度仪来估计^[20,21],也可以通过大动态范围图像(high dynamic range image, HDR)来估计^[37]。在图像校正过程中,送入每个投影仪的图像像素乘上投影仪各自的亮度衰减图,其得到的结果再应用逆向强度转移函数来补偿投影仪输出亮度的非线性特性,最终即可由投影仪投出颜色一致的高分辨率图像。



(a) 全景图像的亮度衰减图



(b) 单个投影仪的亮度衰减图

图4 基于亮度输出匹配的校正技术中的亮度衰减图

Fig. 4 The LAM for the calibration based on the luminance matching

无论是基于颜色输出匹配的校正技术还是基于亮度输出匹配的校正技术,它们都是通过使投影显示区域内所有像素的色彩或亮度响应趋于严格一致来达到解决多投影仪无缝拼接显示中颜色失调问题的目的,但由于这会导致显示图像的亮度和对比度取决于整个显示区域中亮度对比度最差的那个像素^[28,31,38],从而严重影响显示效果。为解决这一问题,文献[18]、[39]、[40]根据人眼的感知特性,即根据人眼分辨不出在一定范围内的亮度差异的特点,提出了一种非严格一致性亮度输出匹配的校正方法,从而把颜色失调问题的处理转化为一个最优化问题,而优化的目标则是在实现投影图像亮度一致性的同时,最大化图像的显示质量,即最大化显示图像的亮度动态范围。而文献[41]则提出要同时考虑投影仪的亮度输出特性和被投影图像的亮度特性,在色彩空间平滑约束下通过拓展输入图像的亮度动态范围,以达到提高投影显示图像亮度的目的。

4 颜色校正技术比较

在各种颜色校正技术未被研究前,由于通常的色彩校正是先通过手工调整每个投影仪的参数(如亮度、对比度、缩放等),然后经过人工判断来完成的,因此具有很大的主观性,其色彩校正的准确性和拼接显示效果都比较差。而前文所述的3种颜色校正技术,在解决多投影仪无缝拼接显示的色彩失调问题时,更多的是强调客观评价标准和尽可能少的人工干预。但是由于各种校正技术假设的前提条件各不相同,例如基于边缘融合的方法是假设输出颜色的帧内和帧间变化可以忽

略;基于单一投影光源的校正方法是假设不存在重叠区,并且灯泡发出的光能够均匀到达每个投影仪的投影系统;基于亮度输出匹配的方法则假设帧内、帧间和重叠区的色度变化可以忽略等等。上述不同的假设前提条件,造成了各种校正技术在解决色彩失调问题上的侧重点不同,从而使每种技术应用于无缝拼接显示的效果各不相同,也存在各自特有的优缺点,现简述如下:

(1)基于边缘融合的校正方法不仅解决了投影仪重叠区的亮度变化问题,同时也考虑到了输入颜色变化对颜色失调的影响。该技术的软件实现方法计算复杂性相对较低,但是不能解决投影仪固有的“黑电平”现象。而硬件方法虽然没有计算量的要求,但是对光学掩模和物理掩模的安装、调试都不方便,造成系统的可维护性和可扩展性都比较差。不论是软件,还是硬件实现方法,由于都忽视了投影仪输出颜色的帧内和帧间变化问题,所以只有当形成重叠区的各投影仪的亮度范围基本一致时,才会有好的显示结果。这一要求在系统初始建立,且规模比较小(2~4个投影仪组成的系统)时,可以通过调整每个投影仪的亮度和对比度等参数来实现,但是随着系统使用时间和规模的增长,该要求则越来越不容易满足,从而严重影响显示效果。

(2)基于单一投影光源的校正技术,该技术通过硬件手段很好地解决了多投影仪颜色输出随时间的变化和投影仪投影图像之间颜色输出的色彩变化的问题,取得了比较好的显示效果,但是由于整个校正技术的实现是基于复杂的光学设备,所需要的专业技术性强,并且受制于灯泡功率和散热的因素,其最大只能支持由9个投影仪组成的投影阵列,所以严重影响了基于该技术的整个无缝拼接显示系统的

可维护性和可扩展性。

(3) 基于颜色/亮度输出匹配的校正技术实现了真正意义上的无缝拼接显示,并能广泛适用于各种规模的无缝拼接显示系统,它既适用于由相同型号投影仪构成的系统,也适用于不同型号投影仪构成的系统,而这是其他 2 种技术所不能实现的。但是这种技术本身也存在着以下 3 大缺点:一是匹配计算量非常大,以颜色匹配为例,完成一次颜色匹配所需要的计算量约为 $O(n^6)^{[42]}$,其中 n 是要计算的公共色彩输出范围所有投影仪的色彩范围个数;另一个是用于获取投影仪颜色输出范围的硬件设备十分昂贵,而且颜色输出范围的获取和处理时间比较

长;第 3 个缺点是经匹配后的图像亮度动态范围大幅度减小,致使虽然达到了无缝显示的目的,但是显示的图像整体偏暗,色彩饱和度低。针对原有技术显示图像亮度动态范围减小的问题而提出的非严格一致性亮度输出匹配的校正方法,在充分考虑人眼的感知特性的基础上,很好地平衡了无缝拼接显示系统的“无缝性”和“逼真性”,同时在计算复杂性、可维护性和可扩展性上也都有不错的表现。但是这种改进技术的一个比较大的弱点是对于由不同类型的投影仪组成的无缝拼接显示系统的适用性不好。

综合上述分析,将 3 种校正技术性能的比较结果在表 1 中列出。

表 1 3 种色彩校正技术的性能比较
Tab. 1 The comparison of the three photometric calibration techniques

输入颜色变化	输出颜色时间变化	输出颜色的帧内变化	输出颜色的帧间变化	输出颜色的重叠区变化	无缝拼接显示效果	计算复杂性	可维护性	可扩展性
A	消除			减弱	一般	低或无	较差	较好
B		消除	消除	减弱	较好	无	差	差
C	消除	消除	消除	消除	较好	最高	较好	好

5 结 论

不断发展的虚拟现实、仿真训练、家庭剧场、科学可视化等领域的应用需求是促使研究基于多投影仪无缝拼接显示系统的源动力。作为基于多投影仪的无缝拼接显示的两个关键性问题——图像的几何失真和颜色失调,前者已经存在较为成熟和有效的几何校正算法,而后者则由于问题的复杂性,一直没有得到很好的解决。近几年来,许多研究机构和研究人员开始关注这一问题,并提出了一些解决颜色失调的校正技术。由于对多投影仪无缝拼接显示的色彩校正技术研究的起步比较晚,特别是国内关于这个领域研究报道的资料还比较少,目前仍然有许多问题需要进一步研究,其中主要包括:

- (1) 由不同类型的投影仪构建的无缝拼接显示系统的色彩校正问题;
- (2) 针对运动中的观察者的无缝拼接显示系统的色彩校正问题;
- (3) 适用于具有任意反射特性和形状的投影屏幕的无缝拼接显示系统的色彩校正问题;

(4) 无缝拼接显示系统色彩一致性的判断标准;

(5) 无缝拼接显示系统的实时色彩校正问题。
现有的多投影仪色彩校正方法主要针对的还是同种类型的投影仪,研究的假设前提是投影图像的观察者位置是不变的,并且多数方法还只是针对特定反射特性的平面投影屏幕。这些限制都在很大程度上影响了多投影仪无缝拼接显示的实用性和扩展性。因此在技术层面,基于现有各种颜色校正技术,研究更加成熟和通用的色彩校正技术是该领域发展的趋势。

对基于多投影仪的无缝拼接显示的色彩校正问题,其研究的最终目的是应用于实际的商用系统,而现有的实验室研究系统还停留在人为的干预或半自动的校正水平上。因此在实现层面,要真正完成从实验室研究系统到商业系统的转化,以下两个因素必不可少,一个是更加客观的色彩一致性判断标准,另一个是系统的色彩自动实时校正。前者目前还没有成熟的研究成果,而对于后者也只是最近才有研究人员研究利用 GPU 通过实时计算来达到提高色彩校正速度的目的^[43]。但是相信随着硬件设备的不断改进,特别是可编程图形加速卡,大规模可编程

逻辑电路和数字信号处理器性能的提高,在统一的色彩一致性判断标准下,将成熟的通用色彩校正方法进行固化是实现大规模无缝拼接显示系统商用化的必由之路。

参考文献 (References)

- Kurtenbach G, Fitzmaurice G. Applications of large displays [J]. IEEE Computer Graphics and Application, 2005, **25**(4):22~23.
- Funkhouser T, Li K. Large-format displays [J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2000, **20**(4):20~21.
- Humphreys G, Hanrahan P. A distributed graphics system for large tiled displays [A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Visualization [C], San Francisco, CA, USA, 1999:215~223.
- Humphreys G, Buck I, Eldridge M, *et al.* Distributed rendering for scalable displays [A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Supercomputing [C], Dallas, TX, USA, 2000:30~37.
- Humphreys G, Eldridge M, Buck I, *et al.* A scalable graphics system for clusters [A]. In: Proceedings of ACM SIGGRAPH [C], Los Angeles, CA, USA, 2001:129~140.
- Buck I, Humphreys G, Hanrahan P. Tracking graphics state for networked rendering [A]. In: Proceedings of Eurographics/SIGGRAPH Workshop on Graphics Hardware [C], Interlaken, Switzerland, 2000:87~95.
- Li C, Lin H, Shi J Y. A survey of multi-projector tiled display wall construction [A]. In: Proceedings of Third International Conference on Image and Graphics [C], Hong Kong, China, 2004:452~455.
- Yuan G D, Qin K H, Hu W. Geometric calibration for multi-projector tiled display based on vanishing point theory [A]. In: Proceedings of International Conference on Computational Science [C], Berlin, Germany, 2006:864~867.
- Hereld M. Developing tiled projection display systems [A]. In: Proceedings of Fourth International Projection Technology Workshop [EB/OL], Ames, Iowa, USA, 2000. <http://www-neu.mcs.anl.gov/fl/publications/hereldoo-ipt.pdf>.
- Raskar R, Welch G, Cutts M, *et al.* The office of the future: A unified approach to image based modeling and spatially immersive display [A]. In: Proceedings of ACM SIGGRAPH [C], Orlando, Florida, USA, 1998:168~176.
- Ulichney R, Sukthankar R. Correcting luminance for obliquely-projected displays [A]. In: Proceedings of International Conference on Consumer Electronics [C], Hong Kong, China, 2005:367~368.
- Yang R G, Gotz D, Hensley J, *et al.* Pixelflex: A reconfigurable multiprojector display system [A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Visualization [C], San Diego, CA, USA, 2001:167~174.
- Li Bin, Xiang Hui. Automatic geometric calibration in multi-projector, display [A]. In: Proceedings of The Fourth China Conference on Visual Reality and Visualization [C]. Dalian China, 2004:422~426. [李斌,向辉.多投影仪拼接中的投影仪自动几何校正[A].见:第四届全国虚拟现实与可视化学术会议论文[C],大连,2004:422~426.]
- Cao Shuang-xi, Chen Fu-min. Implementation of multi-projector display [J]. Computer Engineering and Applications, 2005, **41**(2):84~86. [曹双喜,陈福民.多投影仪拼接显示的实现[J].计算机工程与应用,2005,41(2):84~86.]
- Jia Qing-xuan, Song Jing-zhou, Sun Han-xu, *et al.* Research and development of highly immersive multi-projection virtual environment systems [J]. Engineering Science, 2006, **8**(8):33~38. [贾庆轩,宋荆洲,孙汉旭等.高临场感多投影面虚拟环境系统的设计与实现[J],中国工程科学,2006,8(8):33~38.]
- Zhang Hai, Li Chao, Lin Hai, *et al.* A current display wall software calibration system [J]. Computer Engineering, 2006, **32**(16):215~217. [张海,李超,林海等.一个通用的投影墙软件校正系统[J].计算机工程,2006,32(16):215~217.]
- Majumder A. Properties of color variation across multiprojector displays [A]. In: Proceedings of Society of Information Display's Eurodisplay [C], Saint Quay Perros, France, 2002:807~810.
- Majumder A. A Practical Framework to Achieve Perceptually Seamless Multi-Projector Displays [D]. PhD Thesis. University of North Carolina, Chapel Hill, North Carolina, USA, 2003.
- Majumder A, Gopi M. Modeling color properties of tiled displays [J]. Computer Graphics Forum, 2005, **24**(2):149~163.
- Stone M C. Color and brightness appearance issues in tiled displays [J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2001, **21**(5):58~66.
- Stone M C. Color balancing experimental projection displays [A]. In: Proceedings of 9th Color Imaging Conference: Color Science, Systems and Applications Conference [C], Scottsdale, Arizona USA, 2001:342~347.
- Yang R G, Majumder A, Brown M. Camera based calibration techniques for seamless multi-projector displays [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2005, **11**(2):193~206.
- Li K, Chen H, Chen Y, *et al.* Early experiences and challenges in building and using a scalable display wall system [J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2000, **20**(4):671~680.
- Chen C J, Johnson M. Fundamentals of scalable high resolution seamlessly tiled projection system [A]. In: Proceedings of SPIE Conference on Projection Displays [C], San Diego, CA, USA, 2001, VII:67~74.
- Li K, Chen Y. Optical blending for multi-projector display wall system [A]. In: Proceedings of the 12th Lasers and Electro-Optics Society 1999 Annual Meeting [C], San Francisco, CA, USA, 1999:281~282.
- Pailthorpe B, Bordes N, Bleha W P, *et al.* High-resolution display with uniform illumination [A]. In: Proceedings Asia Display Conference [C], Nagoya, Japan, 2001:1295~1298.
- Moreland J L, Reinsch S. HDD: A Single Light-Source Uniform Tiled Display [M]. San Diego, CA, USA: San Diego Supercomputer

- Center(SDSC) White Paper,2003;1~6.
- 28 Majumder A, Jones D, McCrory M, *et al.* Using a camera to capture and correct spatial photometric variation in multi-projector displays[A]. In: Proceedings of IEEE International Workshop on Projector-camera Systems[C], Nice, France, 2003;118~139.
 - 29 Wallace G, Chen H, Li K. Color gamut matching for tiled display walls[A]. In: Proceedings of Immersive Projection Technology Symposium [C], Zurich, Switzerland, 2003;293~302.
 - 30 Brown M, Majumder A, Yang R G. Camera-based calibration techniques for seamless multiprojector displays [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2005, **11**(2):193~206.
 - 31 Majumder A, Stevens R. LAM: Luminance attenuation map for photometric uniformity in projection based displays [A]. In: Proceedings of ACM on Virtual Reality and Software Technology [C], Hong Kong, China, 2002;147~154.
 - 32 Chorley R A, Laylock J. Human factor consideration for the interface between electro-optical display and the human visual system [J]. Displays, 1981, **2**(6): 304~314.
 - 33 Raskar R, Baar J, Beardsley P, *et al.* iLamps: Geometrically aware and self-configuring projectors [J]. ACM Transactions on Graphics, 2003, **22**(3):809~818.
 - 34 Weissig D, Feldmann I, Schüssler J, *et al.* A modular high-resolution multi-projection system [A]. In: Proceedings of International Conference on Optical Display 2005 [C], Berlin, Germany, 2005;185~193.
 - 35 Schikore D R. High-Resolution multi-projector display walls[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2000, **20**(4):38~44.
 - 36 Bresnahan G., Gasser R, Abaravichyus A, *et al.* Building a large-scale high-resolution tiled rear-projected passive stereo display syste2006m based on commodity components[A]. In: Proceedings of SPIE Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems X [C], Santa Clara, CA, USA, 2003, **5006**:19~30.
 - 37 Raij A, Gill G, Majumder A, *et al.* PixelFlex2: A comprehensive, automatic, casually-aligned multi-projector Display [A]. IEEE International Workshop on Projector-Camera Systems [C], Nice, France, 2003;203~211.
 - 38 Majumder A, Stevens R. Color nonuniformity in projection-based displays: Analysis and solutions [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2004, **10**(2):177~188.
 - 39 Majumder A, Stevens R. perceptual photometric seamlessness in tiled projection-based displays[J]. ACM Transactions on Graphics, 2005, **24**(1):118~139.
 - 40 Majumder A, Irani S. Contrast enhancement of images using human contrast sensitivity[A]. In: Proceedings of 3rd Symposium on Applied Perception in Graphics and Visualization[C], New York, USA, 2006;69~76.
 - 41 Lee H W, Lee B U. Improving brightness for a multi-projector display considering image content[A]. In: Proceedings of Advances in Visual Computing, Second International Symposium[C], Berlin, Germany, 2006: 70~78.
 - 42 Bern M, Eppstein D. Optimized color gamuts for tiled displays. [A]. In: Proceedings of 19th ACM Symposium on Computational Geometry[C], San Diego, CA, USA, 2003;274~281.
 - 43 Harville M, Culbertson B, Sobel I, *et al.* Practical methods for geometric and photometric correction of tiled Projector[A]. In: proceedings of the Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshop [C], New York, USA, 2006: 5~12.