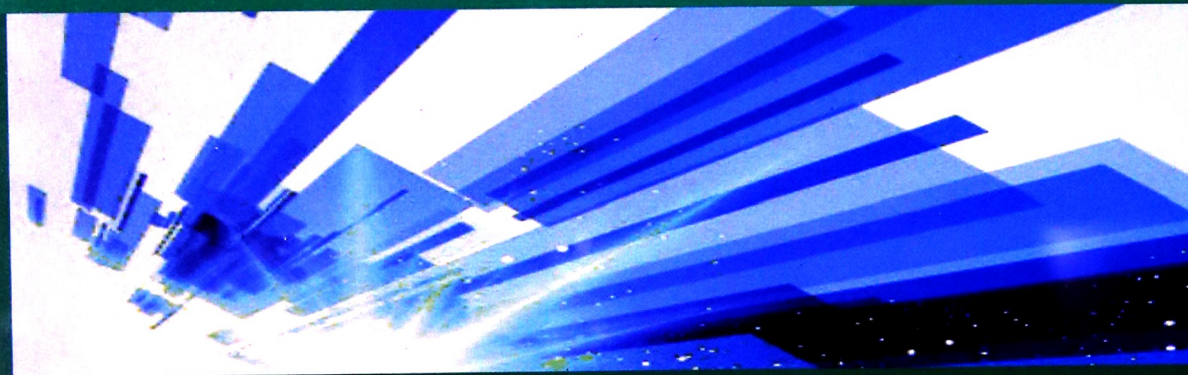


# 沉浸式投影系统设计技术



范静涛 丁莹 薛耀红 杨华民 丛萌 著

CHENJINSHI TOUYING XITONG  
SHEJI JISHU



国防工业出版社  
National Defense Industry Press

# 沉浸式投影系统设计技术

范静涛 丁莹 薛耀红 杨华民 丛萌 著

国防工业出版社

· 北京 ·

## 内 容 简 介

本书针对具有高沉浸感、高逼真感特点,在虚拟样机和特种人员训练上具有广泛应用的沉浸式投影系统的设计核心技术进行了分析和讨论。重点从构建高光学性能一致性的沉浸式投影系统出发,在多投影系统色度、亮度、灰亮、几何形状、立体效果的一致性和正交屏幕散射补偿等问题上,对以光学理论为指导、计算机技术为实现的技术途径进行了论述。

### 图书在版编目(CIP)数据

沉浸式投影系统设计技术/范静涛等著. —北京:国防工业出版社,2015.6

ISBN 978-7-118-10167-6

I. ①沉... II. ①范... III. ①投影系统—系统设计

IV. ①TH761.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 125338 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

\*

开本 710 × 1000 1/16 印张 7½ 字数 128 千字

2015 年 6 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 40.00 元

---

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)88540777

发行邮购: (010)88540776

发行传真: (010)88540755

发行业务: (010)88540717

# 前 言

沉浸式投影系统具有高沉浸感、高逼真度等特点,在交互式设计、虚拟样机和特种人员训练上具有广泛应用。

本书对以 CAVE 系统为代表的沉浸式投影系统的核心设计技术进行了分析。重点从构建高光学性能一致性的沉浸式投影系统出发,在多投影系统色度、亮度、灰度、几何形状、立体效果的一致性和正交屏幕散射补偿等问题上,对以光学理论为指导、计算机技术为实现的技术途径进行了讨论。

多投影机光学一致性关键技术,是所有应用于高端特种模拟训练的多投影系统的共性核心关键技术。本书所论述的设计方法旨在充分利用光学原理和技术,减少甚至摒弃数字图像后处理的使用,使多投影系统具有高沉浸感、高逼真度的效果。主要应用价值体现在:为复杂投影系统的设计提供了理论指导、技术工具和实现途径。

首先要对姜会林教授表示最诚挚的谢意,他循循善诱的学术教导和不拘一格的科研思路给予作者珍贵的启迪。借此书完成之际,谨向姜老师致以最衷心的感谢和崇高的敬意。

其次要对本书作者之一杨华民教授表示最衷心的感谢。杨老师是本书作者范静涛博士、丁莹博士走上科研道路的领路人,让作者能有机会参与论证和承担多项国家级特种电影科研项目,积累了丰富的特种电影理论与经验,从而促成了本书的成稿。

感谢特种电影技术及装备国家地方联合工程研究中心的同事蒋振刚、韩成、陈纯毅、曲福恒、权巍、李华、冯欣、宋小龙等对本书编写提出的宝贵意见。感谢中心的各位硕士研究生张超、魏向锋、孙亚妮、韩天亮、王凯、余佳音、王俏、郑竹萌参与本书的实验验证与实例编写调试工作。特别感谢比利时 Barco 公司为本书提供了大量数据与资料支持,尤其是杨学安、赵易时、王国鹏、周景亭、王越等各位同仁。

最后,感谢我的父母、家人,你们的爱是我幸福的源泉和前进的动力。特别感谢我的妻子在学业和生活上给我的莫大支持!我永远深切地爱你们,谨以此书献给你们。

本书由范静涛、丁莹、薛耀红、杨华民、丛萌共同编写,由薛耀红完成本书的修改、整理。由于作者水平有限,加之时间仓促,疏误之处在所难免,敬请同行学者、业界同仁及各界读者批评指正。

长春理工大学  
2015年3月

# 目 录

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| 第 1 章 沉浸感显示系统技术综述 .....     | 1  |
| 1.1 研究现状及问题 .....           | 1  |
| 1.1.1 关键技术研究现状 .....        | 2  |
| 1.1.2 现存问题总结 .....          | 4  |
| 1.2 章节安排 .....              | 4  |
| 第 2 章 多投影机光学一致性配型与校正 .....  | 7  |
| 2.1 现代投影技术进展 .....          | 7  |
| 2.1.1 三片式 LCD 投影技术 .....    | 8  |
| 2.1.2 三片式 DLP 投影技术 .....    | 10 |
| 2.1.3 三片式 LCOS 投影技术 .....   | 12 |
| 2.1.4 投影技术工程可靠性比较 .....     | 13 |
| 2.2 投影显示设备光学差异机理分析 .....    | 15 |
| 2.2.1 色度差异机理 .....          | 15 |
| 2.2.2 亮度差异机理 .....          | 17 |
| 2.2.3 灰度差异机理 .....          | 19 |
| 2.3 色度一致性优选与配型 .....        | 19 |
| 2.3.1 CIE - XYZ 色度系统 .....  | 19 |
| 2.3.2 色度一致性数字校正方法技术进展 ..... | 22 |
| 2.3.3 分合光棱镜色度一致性优化配型 .....  | 24 |
| 2.4 有效光输出一致性校正 .....        | 29 |
| 2.4.1 数字图像几何校正技术进展 .....    | 29 |
| 2.4.2 数字图像几何校正现存问题 .....    | 30 |
| 2.4.3 投影位姿精确调整技术 .....      | 30 |
| 2.5 光输出一致性校正 .....          | 39 |
| 2.5.1 投影机常光输出技术 .....       | 39 |

|            |                       |           |
|------------|-----------------------|-----------|
| 2.5.2      | 投影机联机常光输出技术           | 40        |
| 2.5.3      | 光输出均匀性数字校正方法          | 41        |
| <b>第3章</b> | <b>屏幕变形检测彩色结构光偏解码</b> | <b>42</b> |
| 3.1        | 彩色结构光研究现状             | 42        |
| 3.2        | 基于7元3级迪布鲁英序列的彩色结构光编码  | 43        |
| 3.3        | 彩色结构光解码方法研究           | 44        |
| 3.3.1      | 基于梯度分析的中心彩色条纹提取       | 44        |
| 3.3.2      | 基于聚类分析的颜色分类方法         | 45        |
| 3.3.3      | 基于双梯度多通道动态规划的特征点匹配方法  | 47        |
| <b>第4章</b> | <b>正交屏幕散射校正</b>       | <b>50</b> |
| 4.1        | 现有屏幕散射校正技术            | 50        |
| 4.2        | 背投CAVE系统光学散射效应建模      | 52        |
| 4.2.1      | 屏幕模型                  | 52        |
| 4.2.2      | 一次散射影响模型              | 54        |
| 4.2.3      | 自身二次散射模型              | 55        |
| 4.2.4      | 多次散射模型及化简             | 55        |
| 4.3        | 正交屏幕散射效应校正算法          | 56        |
| 4.3.1      | 互影响像素范围确定             | 56        |
| 4.3.2      | 像素坐标线性化               | 57        |
| 4.3.3      | 相关参数预计算               | 58        |
| 4.3.4      | GBSRR算法实现             | 59        |
| <b>第5章</b> | <b>立体显示视在距离定量控制</b>   | <b>60</b> |
| 5.1        | 立体视觉研究现状              | 60        |
| 5.2        | 立体深度再现模型与分析           | 61        |
| 5.2.1      | 平行模型                  | 63        |
| 5.2.2      | 内束模型                  | 64        |
| 5.2.3      | 离轴模型                  | 65        |
| 5.3        | 视在距离定量控制研究            | 67        |
| 5.3.1      | 立体深度放大函数的常函数化         | 67        |
| 5.3.2      | 平行模型视在距离动态定量控制        | 69        |
| 5.3.3      | 离轴模型视在距离动态定量控制        | 70        |

|       |                         |     |
|-------|-------------------------|-----|
| 5.4   | 视点位姿可变的 CAVE 立体显示 ..... | 71  |
| 5.4.1 | 多级坐标系统 .....            | 71  |
| 5.4.2 | 视锥参数初始设定 .....          | 72  |
| 5.4.3 | 视锥参数动态设定 .....          | 73  |
| 5.4.4 | 实验效果及分析 .....           | 74  |
| 第 6 章 | 投影系统自动化测量 .....         | 77  |
| 6.1   | 光学畸变模型、测量与校正 .....      | 77  |
| 6.1.1 | 光学畸变模型 .....            | 77  |
| 6.1.2 | 现有畸变校正方法 .....          | 84  |
| 6.1.3 | 基于 GPU 的畸变实时校正算法 .....  | 87  |
| 6.2   | 光学渐晕模型、测量与校正 .....      | 95  |
| 6.2.1 | 光学渐晕数学模型 .....          | 95  |
| 6.2.2 | 现有渐晕效应消除方法 .....        | 97  |
| 6.2.3 | 渐晕效应非线性补偿 .....         | 98  |
| 总结与展望 | .....                   | 103 |
| 参考文献  | .....                   | 105 |

# 第 1 章 沉浸感显示系统技术综述

沉浸感显示系统一般以弧形屏幕、球形屏幕和多面正交屏幕为显示载体,配合立体成像技术,通过对观察者的头部跟踪,还原眼点位置,进行可交互的虚拟现实场景在线渲染。

## 1.1 研究现状及问题

CAVE(Cave Automatic Virtual Environment,洞穴式自动虚拟环境)系统的最初设计目的是提供大屏幕、沉浸式、大规模科学数据交互式可视化环境和工业设计环境。第一套 CAVE 系统,是 1992 年美国伊利诺伊州立大学 EVL 实验室 Cruz - Neira 博士设计出的一套多投影洞穴式 VR(Virtual Reality,虚拟现实)系统<sup>[1-5]</sup>,该系统在 SIGGRAPH'92 会议上进行了展示。这一系统采用 3 块背投屏幕和 1 块正投屏幕,联合构成 7 英尺 × 7 英尺 × 7 英尺的立方体,使用 4 台 SGI Onyx2/Infinite Reality2 图形工作站同步生成的 120Hz 立体图像,通过 4 台图像分辨率为 1280 × 512 的投影机,显示在屏幕上。由于当时图形工作站价格昂贵,所以 CAVE 系统的用户群体为少量的研究所和学术机构。

随着 PC 机关键部件,特别是图形处理单元(Graphic Process Unit,GPU)的性能不断提高,价格不断下降,绝大多数用户可以负担得起的 PC 系统,在处理图形计算的性能上得到了显著提高,已经接近甚至达到图形工作站绘制图形的能力。这使得以 PC 机作为 CAVE 系统的图像生成器(Image Generator,IG),从而大幅降低系统造价成为了可能。乔治亚理工学院的 NAVE 系统<sup>[6]</sup>就是这类低成本 CAVE 立体显示系统的典型代表。该系统是由 CAVE 系统引申出的一类廉价的沉浸式多投影系统,由 3 块投影幕拼接而成,幕与幕之间的拼接夹角为 120°。图形绘制系统由 6 台 PC 机和图卡组成。每块屏幕的实时立体图像绘制由两台 PC 机完成。

匹兹堡大学 Jeffrey 设计的 BNAVE 系统(Balance NAVE Automatic Vsrtual Environment,BNAVE)<sup>[7]</sup>,以 NAVE(NAVE Automatic Virtual Environment,NAVE 自动虚拟环境)为基础,进行了一系列改进:增加了一个底面,以此为户提供更宽阔的视野;采用数字图像处理的方式对投影图像的一致性和头部跟踪视

锥的校正;采用了圆偏振片进行被动立体显示,以解决立体显示的头部倾斜和底面匹配问题。

德国设计并研制的 HyPI-6 系统<sup>[8]</sup>,采用了 6 个投影面的 CAVE 系统形式,大大增加沉浸感。用户视野范围完全被屏幕覆盖,使用户主观感受与生成的虚拟环境达到深层次的融合,进一步提升了系统仿真环境的沉浸感与真实感。

浙江大学研制的 CAVE 系统<sup>[9,10]</sup>和大连海事大学研制的 CAVE 系统<sup>[11]</sup>均采用了 PC 机作为图像生成器,是国内“廉价”CAVE 系统的典范。

以降低成本的方式,扩大 CAVE 系统的用户群体是研究的发展趋势。在低造价 CAVE 系统中,出于成本考虑,多选用未经严格挑选的商用投影机作为显示装置。商用投影机一般不具备严格的光学一致性,在色度、亮度(光通量及空间均匀性)、灰度响应上有很大差异,这使得大多数研究者偏向于使用图像后处理技术(Post Image Process),对投影图像进行有损的颜色和亮度校正。同时,商用投影机无法进行精确的、定量的焦距和移轴量调节,无法在系统设计期进行严格的光路设计,必须进行图像的数字几何校正,才能达到投影图像和屏幕区域相匹配。

### 1.1.1 关键技术研究现状

#### 1. 颜色、亮度、灰度一致性数字校正技术

加利福尼亚大学 Majumder 等人,通过光谱辐射度计和商用普通相机两种辅助检测修正的方法建立了颜色失真的亮度匹配以及色度匹配的算法。Stone 和 Wallace 等人<sup>[12-14]</sup>从不同类型投影机的特征化、色域变换、色域匹配以及颜色测量等方面对拼接投影显示的颜色均衡性进行了全面的分析,并从投影机光源、成像器件、视角变化以及屏幕反射特性等方面讨论了亮度不均匀产生的原因,以此为基础提出了针对不同类型投影系统(单片式 DLP 和三片式 LCD)拼接显示的非参数全色域颜色匹配算法。Steele 等人<sup>[15]</sup>则直接通过调整投影机的亮度、对比度等硬件设置参数来达到颜色校正目的,另外,为了对多投影机拼接显示的颜色校正结果进行评价,Majumder<sup>[16]</sup>还提出了一种采用相机的相对评价来代替主观视觉评价的方法。

#### 2. 数字几何校正技术

Surati 最早实现了一套  $2 \times 2$  软件校正拼接的显示墙<sup>[17]</sup>,该方法通过在屏幕前放置精密的网格来进行相机在屏幕空间上的校正,然后建立一个查找表进行快速映射变换,获得屏幕投影的目标位置。Pixelflex<sup>[18,19]</sup>使用单一的广角相机实现校正,事先对相机进行校正,然后建立相机和投影机间的单应矩阵。文献[20]使用带可控制云台的相机(平移—倾斜—缩放)来高分辨率地捕获投影

机重叠区,然后用模拟退火方法来进行全局优化。优化的目标是最小化重叠区点和点间的距离,以及线与线间的夹角。该方法不需要校正相机,能获得较高精度,但收敛非常慢,校正前投影机物理位置必须基本对齐,否则可能收敛于局部最小值处。文献[21]扩展了 Pixelflex 中的方法,建立了单应矩阵树,类似全景图生成一样,使用多个相机分别拍摄投影区域的各部分,然后将其映射关系联系起来,提高了算法的可扩展性。文献[22]在这些工作基础上,采用二次校正方法,第一次校正主要用于削去投影机和相机的非线性因素,第二次校正通过大量特征图案的投影和拍摄,优化算法精度。

### 3. 立体效果控制技术

虚拟现实系统采用对应于左右眼的两个视锥进行立体图像的生成。Cheng 在文献[23]中论述了两种双目视锥几何位置关系模型:平行轴方式、内束(toe-in)方式。Robert<sup>[24]</sup>认为虽然平行轴方式的摄像机摆放不会出现影响视觉融合的垂直视差,但其也有局限性,如这种方式取得的每个眼的图像只能取一部分从而使单眼的视场角减小,这会造成双眼点和零视差面所围成的可视区减小,在一些应用中如增强现实中可能会影响物体信息的获取。H. Yamanoue<sup>[25]</sup>认为平行轴方式设置摄像机是通过线性方式将空间物体映射到立体图像中。而内束方式是通过非线性方式映射的。杨小革<sup>[26]</sup>分析了内束模型的立体成像视差特点,但未总结其规律和改进方法。顾郁莲<sup>[27]</sup>等分析了平行模型和移轴模型在可生成的视差范围上的差异,认为移轴模型更好。王式孟<sup>[28]</sup>提出了传统光学摄像机立体摄影的基线控制方法,在平行模型下,根据被摄物体最近和最远物距作为参考,通过调节基线长度,获得预期范围的立体视在效果。2003年,孙延禄<sup>[29-31]</sup>连载发表长文,系统阐述了传统光学立体摄影系统的理论,对比了各种立体拍摄模式的优缺点,认为离轴(原文为移轴)模型最佳,并分析了立体观察特点,首次将立体技术研究贯穿于拍摄、放映、观察环节。总结了立体视在控制规律,以及各参数变化对视在效果的影响。房慧聪<sup>[32]</sup>等分析了特定立体显示中,观察者参数变化对视在效果的影响,提出了最佳观看位置的选取方法。文献[33-36]从不同角度和出发点,分别总结了多种模型的双目立体生成模型,较为系统地描述了各种模型中视差的生成机制和函数化描述。颜臻<sup>[37]</sup>提出了虚拟现实中,将物体中心点置于特定视在距离上的物距快速计算公式。赵猛<sup>[11,38]</sup>等结合 CAVE 系统搭建过程,分段立体视在距离控制方法。王爱红<sup>[39]</sup>等提出了多孔径光学系统立体视差获取方法:采用多个分立的平行光学系统,构建多种基线长度,以获取理想的视差。2010年之后,综述性文献[40,41]对立体显示、立体观察这两方面的研究现状做了很好的总结。文献[42-46]研究重点转向如何控制参数,以在虚拟现实环境中获得理想的视差,并在特定的观察参数下,求解物距和视在距

离相对的变化关系。

#### 4. 其他相关技术研究

CAVE 系统中,投影幕相邻区域存在着投影光线的相互散射干扰,少数研究者<sup>[47]</sup>也在开展散射效应的离线(非实时)数字补偿技术研究工作。

从工程应用角度,CAVE 系统还需解决多台计算机的立体渲染同步问题,现有方法多采用软硬件多级同步机制,达到了良好的立体同步效果。

### 1.1.2 现存问题总结

总结 CAVE 系统的关键技术研究,可以概括为“6 个一致性”:色度一致性、亮度一致性、灰度一致性、几何一致性、立体效果一致性、同步一致性。

在这 6 个一致性中,同步一致性技术成熟,而其他 5 个一致性技术都还有深入研究的空间和潜力,还存在数字技术难以解决的技术问题。现存问题可归纳为以下几点:

(1) 色度、亮度、灰度一致性数字校正技术,是有损校正,是以损失各投影机色域空间和亮度范围为代价的,只能实现人主观感受的一致,难以求得人主观感受的最佳。

(2) 数字几何校正技术,是有损校正,是以损失画面分辨率和空间光能分布均匀性为代价的,只能求得投影区域形状的一致,不能求得投影画面像素分布的一致。

(3) 立体效果控制研究,以定性研究和特定环境研究为主,普适的立体效果优化控制研究有待加强。

(4) 屏幕散射影响研究较少,技术实用性有待加强。

## 1.2 章节安排

本书致力于将 CAVE 构建成为高沉浸感、高真实感、高一致性、低维护量的虚拟现实环境,采用高亮度多投影系统进行长时间仿真训练。本书共分 6 章。

第 1 章:沉浸感显示系统技术综述。对沉浸感显示系统的发展历程和技术脉络进行了梳理和总结,明确了现有研究的特点和局限性。

第 2 章:研究了多投影系统光学一致性匹配与校正技术。分析了多种现代投影技术,并深入剖析了其存在色度、亮度、灰度差异的机理;综合光学一致性控制难易程度和工程可靠性因素,得到了适合 CAVE 系统的投影机选型原则;针对色度一致性,提出了一种三色分光棱镜的光学优选配型数学模型;针对有效光输出一致性,提出了一种投影机精确位姿调整方法;针对亮度一致性,提出了基于

CLO(Constant Light Out)技术的光输均匀性的数字校正方法。通过实验结果和工程效果,也验证了上述方法可保障多投影机具有较高的光学性能一致性。

第3章:研究了用于屏幕变形检测的彩色结构光编解码方法。提出了一种全新的 De Bruijn 彩色结构光编码图像高精度的解码方法,包括:基于梯度分析的中心彩色条纹提取、基于聚类分析的颜色分类和基于双梯度多通道动态规划的特征点匹配方法。实验表明该方法在不需要假定待测物体全表面单调和严格限制其连续性的条件下,可以有效地改善解码精度,具有较强的鲁棒性,为后续屏幕变形的高精度检测和校正打下了基础。

第4章:研究了正交屏幕散射校正技术。介绍了现有的屏幕散射校正技术发展情况、实现机制和现存问题。其次,针对背投正交投影系统进行了屏幕的光学参数化建模。之后,提出了将像素屏前辐照度表达为投影机贡献、一次散射贡献和自身二次散射贡献进行描述的数学模型;推导了此三部分的递推公式和散射次数趋向于无穷时的量化计算公式;给出了在 GPU 上进行散射校正的并行计算方法及实验结果。

第5章:研究了视点位姿可变的 CAVE 系统中立体视在效果动态控制模型。介绍了双目立体视觉的技术发展历程和立体深度再现的研究现状;分析了在虚拟场景中双目立体视锥的三种模型:平行模式、内束模式和离轴模式,在屏幕视差和立体深度再现的各自特点;推导了离轴模式双幕视锥参数“物距—视差—视在距离”计算公式;分析了视在距离计算公式的非线性因素;提出了立体深度放大率的常函数化方法。结合虚拟仿真环境中常用的对称视锥和非对称视锥,分别给出了视在距离动态定量控制的多参数计算公式。针对 CAVE 系统,研究了观察者头部位姿改变的视差方向随动方法。通过实验,验证了上述方法可生成线性的立体深度再现效果,同时也可有效地应对观察者头部位姿动态改变,始终保证屏幕视差方向平行于观察者双眼连线方向。

第6章:以广角相机作为几何检测工具为出发点,开展了相机光学畸变数字校正研究。介绍了畸变校正所需的数理模型,包括图像坐标系、成像平面坐标系、摄像机坐标系和世界坐标系4个参考系的定义,摄像机标定模型以及非线性畸变模型,并对各模型进行了理论分析和归纳;然后介绍了几种常见的畸变校正方法并以实例的形式对其原理进行了解释;最后,将 GPU 硬件和 CUDA 软件架构相结合,使用适用于大数据量并行计算的 GPU 来解决现有畸变校正算法为降低数据量而牺牲计算精度的问题,提出了一种基于可编程 GPU 的大视场景物畸变实时网格校正算法;通过实验验证了该算法能够在保证校正精度的前提下,使计算速度成级数次增长。

以广角相机作为照度检测工具为出发点,开展了相机光学渐晕效应消除研

究。介绍了光学渐晕的数学模型:余弦渐晕和光阑渐晕;分析了现有数字图像渐晕效应消除方法的基本形式,找到了现有方法认为相机响应函数是线性函数的不足;提出了相机响应函数非线性建模和渐晕效应照度补偿函数建模方法;得到了包含相机响应函数非线性因素的数组图像渐晕效应消除方法;通过实验验证了该方法校正精度高。

本书最后对研究工作做了总结,并对以后的研究工作进行了展望。

# 第 2 章 多投影机光学一致性配型与校正

CAVE 是典型的多投影机高亮度多屏幕背投系统,与多投影机单屏幕系统不同,在屏幕和屏幕之间,无法使用边缘融合技术消除或减轻不同投影机间颜色、亮度差异。构建沉浸感较高的 CAVE 系统,必须分析对投影机的色度、亮度(光通量)、灰度(灰阶响应)差异的形成机理,并针对性进行校正。本章针对多投影系统的光学一致性问题开展了研究工作。

## 2.1 现代投影技术进展

投影机原型出现在 1640 年<sup>[48]</sup>。自 20 世纪 80 年代阴极射线管(CRT)投影机出现,投影技术已经过了 30 余年的发展。现在较成功的商用投影技术,主要分为 LCD 投影技术、DLP 投影技术和 LCOS 投影技术,这些技术统称为调制投影技术。

调制型投影显示系统通常由光源、照明光学系统、空间光调制器、驱动电路系统和投影成像光学系统等部分组成<sup>[49]</sup>,如图 2.1 所示。

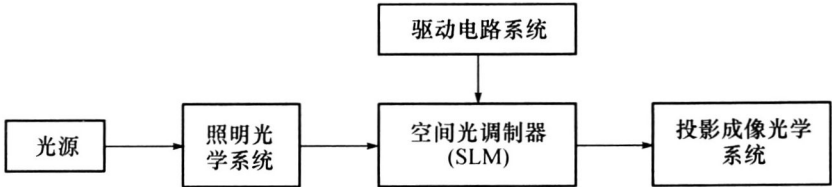


图 2.1 调制投影系统组成图

空间光调制器(SLM)的作用是将照明光学系统输送的白光进行色彩强度的空间调制,可分为分时调制和同时调制两种体制。

分时调制是将一个视频帧周期分割为若干时间片,在每个时间片内使用同一个 SLM 调制出该原色对应的白光光强,再使用色轮<sup>[50,51]</sup>进行滤色,利用人眼的视觉暂留效应进行色彩合成。单片式 LCD、单片式 DLP、单片式 LCOS 均采用的是这种调制方式。双片式 DLP<sup>[48]</sup>虽增加了一个 SLM,但本质上仍是色轮,也属于分时调制机制。色轮基本结构和工作原理如图 2.2 所示。

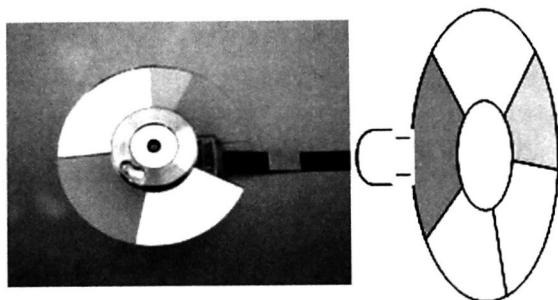


图 2.2 色轮基本结构和工作原理

如图 2.3 所示,同时调制是使用光学系统将白光分解为三原色光(RGB),使用 3 个 SLM,同时分别调制原色光强,进行颜色合成。

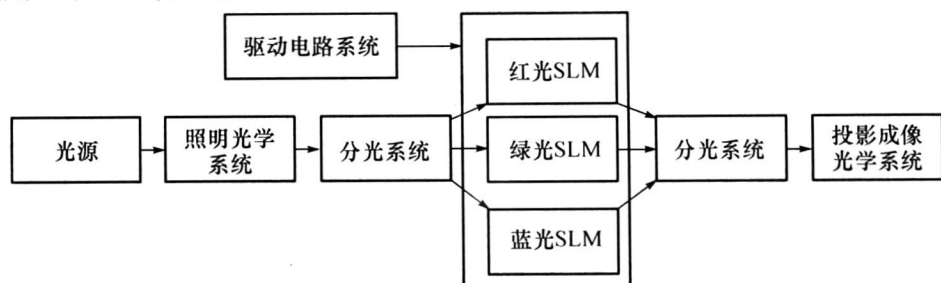


图 2.3 同时调制原理示意图

目前,分时调制的投影机只适合于低亮度的低端应用,因为色轮在高温环境中老化严重,产生色彩漂移。

构建 CAVE 系统时,为消除太阳效应(Hot Spot),会选择低透过率的背投屏幕,故要求投影机工作在较高级别的光输出状态下,一般为 7000 ~ 20000lm。因此,以下分析同时调制的几种投影技术。

### 2.1.1 三片式 LCD 投影技术

三片式 LCD 投影光路如图 2.4 所示。白光光源经积分透镜进行均匀性校正,经偏振光变换原件转换为 S 偏振光,经过多个二向色分光镜和全反光镜,分解为红绿蓝三原色光,分别送至 3 个 LCD 面板进行空间光强调制。调制后的三原色光经过立方棱镜进行色彩合成并输出。

LCD(Liquid Cristal Display)即液晶显示。液晶是面板中发挥着关键作用的一种物质,是有机物,状态介于固体和液体之间,具有规则性的分子排列。投影设备的液晶几乎都工作在扭转向列模式。液晶被封闭在偏振方向正交的起偏和检偏器之间。在上下表面的电压作用下,液晶分子垂直电场排列,从起偏器方向

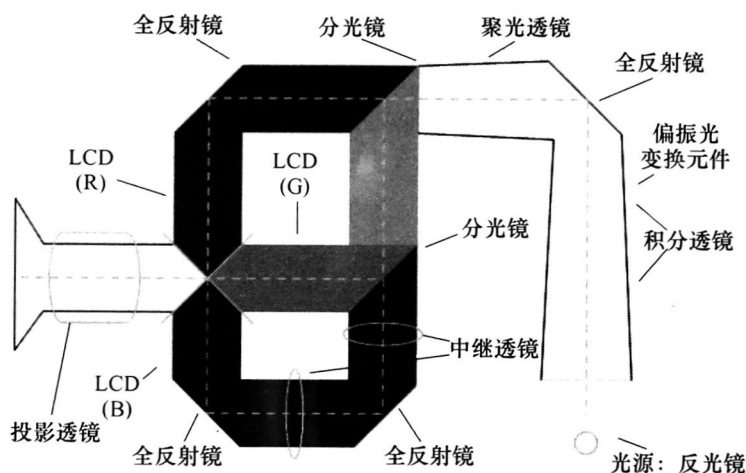


图 2.4 三片式 LCD 投影机光路示意图

入射的光线,偏振方向不变,故无法通过检偏器,液晶不透明。在无电压作用时,液晶分子的指向在上下表面之间扭转  $90^\circ$ ,此时从起偏器入射的偏振光的偏振方向也随着液晶分子旋转  $90^\circ$ ,变为与检偏器偏振方向相同,液晶透明。电压的变化,可改变液晶分子旋转角度,实现从透明到不透明的渐变。LCD 工作原理如图 2.5 所示。

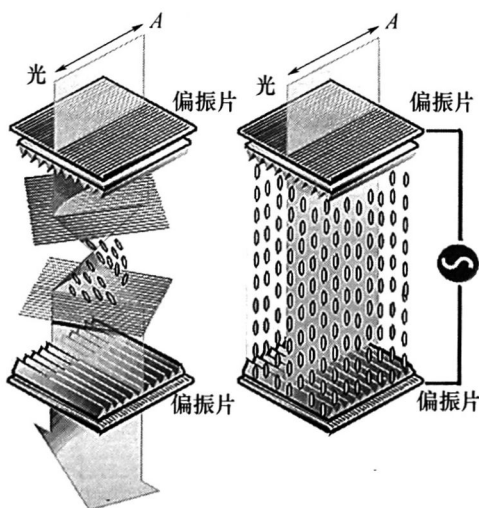


图 2.5 液晶工作原理示意图

可见电压是 LCD 作为空间光调制器的决定条件。文献[52]指出,在液晶投影机中,电寻址的有源矩阵扭曲向列液晶显示。AMTNLCD 是由一系列的薄膜晶体管 (TFT) 构成选址原件,列向电极与输入信号相连,行向电极始终与寄存器