

中文图书分类号：TP24

密 级：公开

UDC： 621

学 校 代 码：10005



硕 士 学 位 论 文

MASTERAL DISSERTATION

论 文 题 目：基于相机反馈的多投影拼接系统研究

论 文 作 者：张亚

学 科：机械工程

指 导 教 师：苏丽颖 副教授

论文提交日期：2016年5月

UDC: 621
中文图书分类号: TP24

学校代码: 10005
学 号: S201301104
密 级: 公开

北京工业大学工学硕士学位论文

题 目: 基于相机反馈的多投影拼接系统研究

英文题目: THE RESEARCH OF MULTI-PROJECTOR
MOSAIC SYSTEM BASED ON CAMERA
FEEDBACK

论 文 作 者: 张亚

学 科 专 业: 机械工程

研 究 方 向: 机构及机器人系统分析与控制

申 请 学 位: 工学硕士

指 导 教 师: 苏丽颖 副教授

所 在 单 位: 机械工程与应用电子技术学院

答 辩 日 期: 2016 年 5 月

授 予 学 位 单 位: 北京工业大学

独创性声明

本人声明所提交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得北京工业大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

签 名： _____

日 期： 年 月 日

关于论文使用授权的说明

本人完全了解北京工业大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留送交论文的复印件，允许论文被查阅和借阅；学校可以公布论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。

（保密的论文在解密后应遵守此规定）

签 名： _____

日 期： 年 月 日

导师签名： _____

日 期： 年 月 日

摘要

随着计算机技术的快速发展和人们对大尺寸、高清晰画面的需求，大屏幕显示系统广泛应用于科学传播、虚拟现实、远程控制、媒体宣传等领域。大屏幕显示的实现方式有很多种，其中大尺寸平板显示设备价格昂贵；电视拼接墙有明显拼接缝，破坏了画面的整体感；LED 显示屏画面质量不够高。研究采用多个投影机拼接实现高分辨率大屏幕显示系统有较好的实用价值和现实意义。

实现多投影拼接系统需要解决的两个核心问题是几何校正和亮度校正。几何校正主要负责各台投影机画面正确拼接显示；亮度校正主要负责解决整个画面的亮度统一性。现有技术主要是借助相机构建投影机和屏幕之间的反馈系统，建立投影机坐标系和屏幕坐标系的单应性矩阵，进而实现对输出图像的预校正。本文同样借助相机构建多投影拼接系统，不同的是本文简化了坐标系对应关系求取公式，通过投射、拍照特征点图像，借助 OpenGL 纹理贴图功能即可实现图像校正。本文对平面幕和曲面幕设计了不同的方法。最后对相关硬件设备进行调研和选型，构建实验用硬件平台和软件系统对本文所论述原理方法进行实验。本文主要工作内容主要有如下几个方面：

平面几何校正。使用二进制编码算法对特征点进行编码并按规律投影，设计相关算法驱动摄像头拍摄特征点图像，并进行前期照片优化处理。设计算法扫描照片并识别出特征点，进而实现几何校正。

曲面几何校正。借鉴三维重建中相关方法用于曲面投影几何校正中。应用格雷编码方法把投影机坐标系中每个像素分别进行编码并投影。用数码相机拍照并解码，建立相机坐标系和投影机坐标系对应关系，进而实现几何校正。

亮度校正。研究两台投影机图像重叠区域亮度优化降低方法。通过分析对比选取合理的融合函数，制作蒙版图像，与输出图像同步输出，实现亮度校正。

试验系统硬件平台调研与搭建、软件系统编写。对市场存在的投影机进行了充分的调研并进行分析对比和论述。最终选择了适合实验环境的硬件设备。按照程序编写相关原则，理清程序运行流程，把程序进行模块化分，最终进行多投影拼接系统软件程序代码编写。

关键字：几何校正；亮度校正；硬件集成；软件系统

Abstract

With the rapid development of computer technology and the demand for large-size, high-definition picture image, large screen display system widely used in science display; virtual reality; remote control; media Propaganda and other fields. There are several modes to realize the large screen display system. The large-size flat panel display device is expensive; TV mosaic wall has obvious seams witch effect the display; the LED display picture quality is not very high. So the research that several projectors tiled to create a seamless, high-resolution display is more practical value and practical significance.

The core problems of multi-projector system to correctly show the image are geometric correction and brightness correction. Geometric correction mainly used to solve the problem of each projector screen tiled correctly; brightness correction mainly to solve the problem of screen brightness consistency. The current method is use a camera to construct a feedback system between the projector and screen, establish corresponding matrix between the projector and the screen coordinates, thus achieving the pre-correction of output image. This paper also use a camera to construct the multi-projector system, the difference is that this paper simplifies the formula to strike correspondence between the coordinate system. Through projection and photograph the feature point image, with the help of OpenGL texture mapping can realize image pre-correction. For flat screen and curved screen this paper designed different approaches. Finally, research and select related hardware to build a hardware platform and software platform to experiment our system. The main contents of this paper are the following aspects:

Geometric correction for the flat screen. Using binary encoding algorithm to encode the feature points and project the feature points with a law. Design related algorithms to drive camera to capture the feature point image and optimize the photo. Design algorithms to scan photos and identify the feature points, thus achieving geometric correction.

Geometric correction for the curved screen. Reference the method for three-dimensional reconstruction to realize geometric correction for the curved screen.

Using Gray encoding method to encode and project each pixel in the projector coordinates. Using a camera to take photos and decode to establish coordinate correspondence relationship between camera coordinate and the projector coordinate, thus achieving geometric correction.

Brightness correction. Research the overlapping area's brightness decay method. Through analysis and comparison select appropriate fusion functions. Make mask images then synchronized output with the display image to achieve the brightness correction.

Survey and construct the hardware platform of test System, write the software system. Make the projectors' market research comprehensively then analysis and compare and discuss in this paper. Finally select the appropriate hardware equipment for test environment. In accordance with the relevant principles of righting a program, clarify the process of the program running then make module division of the program. Finally write all the code of multi-projector system.

Keywords: Geometric Correction, Brightness Correction, Hardware Integration, Software System

目 录

摘 要.....	I
Abstract.....	III
第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景与意义.....	1
1.2 多投影拼接系统研究现状.....	3
1.3 本文的主要内容及组织结构.....	8
第 2 章 基于特征点编码的平面几何校正.....	11
2.1 引言.....	11
2.2 基于相机的软件校正方法.....	11
2.3 平面投影幕的分段线性几何校正方法.....	15
2.3.1 几何校正算法流程.....	15
2.3.2 特征点图像生成和投影.....	16
2.3.2 驱动相机对特征点图像进行拍照.....	19
2.3.3 特征点对应关系求取.....	21
2.3.4 投影有效区域的求取.....	25
2.3.5 投影图像的预处理和输出.....	26
2.4 本章小结.....	30
第 3 章 基于结构光编码的曲面投影几何校正.....	31
3.1 引言.....	31
3.2 平面几何校正和曲面几何校正对比.....	31
3.3 结构光编码介绍.....	32
3.4 格雷编码方法.....	34
3.5 格雷编码方法应用于几何校正.....	35
3.6 本章小结.....	41
第 4 章 亮度校正.....	43
4.1 引言.....	43
4.2 Alpha 通道简介.....	43
4.3 Alpha 蒙版图像.....	44
4.4 Alpha 融合函数.....	46
4.5 亮度校正实施.....	48

4.6 本章小结.....	49
第 5 章 投影拼接系统硬件集成.....	51
5.1 引言.....	51
5.2 系统组成.....	51
5.3 投影仪调研综述.....	52
5.3.1 投影仪种类.....	52
5.3.2 投影仪的几个重要指标.....	55
5.3.3 投影仪的选择.....	56
5.3.4 主机、相机等设备选择.....	57
5.4 本章小结.....	58
第 6 章 投影拼接软件系统设计.....	59
6.1 引言.....	59
6.2 软件系统设计原则.....	59
6.3 系统总体分析.....	60
6.4 系统模块划分.....	61
6.5 主要模块实现.....	62
6.5.1 配置信息读取模块.....	62
6.5.2 摄像头驱动拍照模块.....	63
6.5.3 特征点图像显示模块.....	65
6.5.4 几何校正模块.....	65
6.5.5 亮度校正模块.....	65
6.5.6 通信模块.....	65
6.5.7 图像显示模块.....	66
6.6 软件工具与软件环境.....	67
6.7 本章小结.....	67
结论.....	69
参考文献.....	71
攻读硕士期间发表的学术论文.....	75
致谢.....	77

第 1 章 绪论

1.1 研究背景与意义

近些年来，高清晰、大尺寸显示画面的需求越来越多，应用越来越广泛^[1]。在科学研究方面，较大量级科学数据的可视化需要在较大规模的显示屏上进行展示；在娱乐方面，高分辨率的视频已成为人们共同的需求，例如 Imax 巨幕电影；在企业应用方面，出现了大屏幕的远程会议系统、大屏幕的工业运行控制系统。在许多行业，有了大屏显示系统的支撑，展示性与应用性均可得到较大的提升。

大尺寸平板显示设备、电视拼接墙、LED 大屏幕显示系统、基于投影仪的大屏幕显示系统是当前应用的大屏幕显示系统的主要类型。

CRT 电视已经慢慢淡出市场，所有电视显示设备发展的方向都是尺寸更大、更加清晰、超薄，目前市场出现了像 103 英寸等离子电视的较大尺寸单一显示设备。在环境空间相对较小的场合，比如一些中小型的会议室，一个大尺寸电视也能满足演示汇报要求，而且可以降低工程安装难度。因此，大尺寸平板显示设备是中小型会议室常用设备。大尺寸电视安装简便，集成的音视频接口丰富，既可以用作电视也可以用作其他信号源的显示设备，空间利用率高，但该设备尺寸越大，价格越昂贵，而且分辨率适应性较差。

当单一平板显示设备的尺寸扩展速度无法满足要求时，人们用多个显示屏构建了电视拼接墙。电视拼接墙主要是通过堆砌多个显示器形成 $m \times n$ 的显示器阵列，构成大尺寸的显示屏。比如单一显示屏的分辨率为 1024×768 ，用四个这样的显示屏组成一个 2×2 的显示阵列，则屏幕总体分辨率可以达到 2046×1536 ，如图 1-1。电视拼接墙系统主要由显示器单元、处理器、电视接口设备等一些外设共同构成。通过内置的处理器把将要显示的画面进行分割处理，输出 $m \times n$ 个子图像分别输送给各个子显示器，最终在电视墙上显示一幅完整的画面。

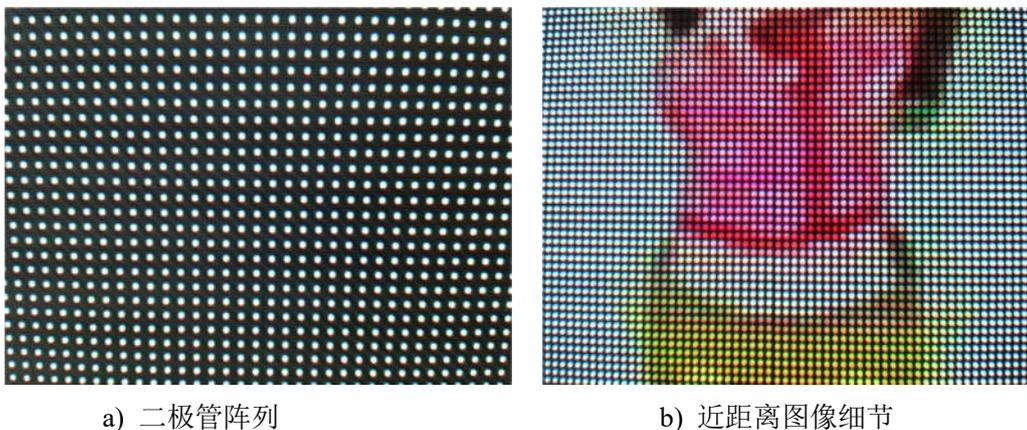
电视拼接墙被广泛应用于远程调度控制、交通管理、户外视频广告等领域。但是这种显示系统有个缺点就是相邻显示器之间有明显的边框，随着技术的进步，某些厂家可以把边框减小到很小，有的减小到 0.2mm ，但是通过肉眼仍能察觉到，如图 1-1 所示。黑色边框的存在割裂了图像的完整性进而降低了观赏性。此外，拼接墙的价格也相对昂贵。



图 1-1 电视拼接墙显示效果

Fig.1-1 The display of TV mosaic wall

LED 显示屏是由成千上万个细小的发光二极管组合成的显示屏幕，如图 1-2 所示。LED 发光二极管有红绿蓝三种颜色并且显示方式可以控制，通过设置可以在屏幕上显示文字和视频。LED 显示屏可以长期在户外使用，这是其比较突出的优点。但是较大面积的 LED 显示屏仍然需要多个显示屏拼接而成，会有拼接缝隙的存在。LED 显示屏存在的较大的问题是其马赛克现象比较严重，近距离观看画面颗粒感比较严重，如图 1-2，影响画面的整体性和观赏效果。LED 显示屏一般用于对画面显示质量要求不高的视频图像文字的显示。如果应用场景对画面显示效果要求较高的话，则 LED 显示屏无法满足要求。



a) 二极管阵列

b) 近距离图像细节

图 1-2 LED 显示屏组成和显示效果

Fig.1-2 The component of LED and it's display details

基于投影仪的显示系统可以使用一台高分辨率投影仪或者多台投影仪的组合。如果需要的画面显示尺寸不是太大，可以使用单一高分辨率的投影仪进行显示，但是相关型号费用较高，投影仪的价格随着分辨率的增高会成指数级增长。所以多数情况下是多台普通分辨率投影仪进行投影拼接来组成大屏显示系统，即多投影显示系统，就是将一幅图像分割为若干图像片段，然后分发给不同的投影

仪进行投影显示，最终拼接显示在屏幕上的是一幅画面连续、亮度色彩统一的画面^[2-6]。



a) 奥运开幕式盛况

b) 所用投影仪

图 1-3 北京奥运会中的多投影拼接

Fig.1-3 Multi-projection mosaic in The Beijing Olympic Games

多投影显示以其构建方便、价格相对低廉、可移植性高等优点，在国内外计算机视觉、会议室系统、科学数据可视化、虚拟现实等领域得到广泛应用^[7-11]。在 2008 年北京奥运会开幕式上，设计人员在观众坐席中放置了 63 台大型数字投影仪进行投影拼接，在鸟巢四周形成了 21 组连续显示的画面，如图 1-3。各台投影仪画面自然拼接，画面甚为壮观。在 2009 年的春节联欢晚会上，舞台设计者采用了 6 台 17000 流明的投影仪组合成上下两层边缘融合方阵，将美丽的牡丹花影片投射到总长约 36 米高 14 米的屏幕上，配合多样化的灯光设计效果，在超大的屏幕上实现了绚丽的舞台背景^[12]。多投影拼接技术在这两次大型活动的使用堪称其在国内的经典之作。之后，国内对多投影技术和硬件的需求越来越大，拼接技术进步的同时，投影幕也从平面扩展到柱面、球面等曲面。基于多投影仪的拼接显示系统已成为大屏幕显示的重要发展方向^[13]。

1.2 多投影拼接系统研究现状

对于多投影拼接显示的研究国外起步较早，技术和设备也发展的较快。在国内许多科学家也进行深入细致研究，但是相关进展与国外相比仍然有一定的差距。在实验室中进行的研究、产生的技术，对外界实验条件要求较高，还不能完全满足市场以及商业化的需要。目前相对成熟的系统在国外已经出现，如瑞典的 Watchout 和德国的 Coolux 是比较典型的系统，但是这些产品价格一般较为昂贵，消费者购买某一型号系统产品后扩展性比较差。国内市场上也有许多公司推出了多投影拼接处理系统，处理效果也达到了一定的水平。

多投影拼接显示系统的研究在国外主要有：美国斯坦福大学搭建的交互式投影机工作平台、加利福尼亚大学构建的投影机显示阵列^[14]、普林斯顿大学的大屏幕显示墙^[15]等。这些都是国外先进的高校和研究机构研发的比较成功的、有应用价值的多投影拼接系统。在国内一些高校和研究机构也率先起步，进行了相关研究，比如浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室的多通道环幕系统^[16-18]。

按照投影图像拼接方式区分多投影机拼接显示系统可以分为基于硬件的人工拼接和基于软件的自主拼接^[19-21]。基于硬件的拼接中，需要根据实际情况设计一个固定投影机的支架或底座，如图 1-4 所示。该底座可以提供多个自由度，然后通过相关技术人员调节底座改变投影机位置信息，最终调节效果是所有相邻投影机的输出图像恰好能无缝、无重叠进行拼接显示为一幅大尺寸画面。普林斯顿大学和美国最大的科学工程研究室 Argonne 联合研发了一套硬件校正设备，它可以为固定在上面的投影机提供 5 个自由度的调节。但是这种方式的物理机械校正正在应对数目较多的投影机组成的系统时需要花费大量的工时。基于机械校正的多投影拼接系统存在如下问题：

(1)在多投影系统硬件构建时需要经验丰富的专业人员对投影机的位置方向进行精确的调节，后期维护也要依赖专业人员，人工成本较高。

(2)当投影机的数量较多时，需要花费很多的时间和精力。

(3)如果因为外界因素导致系统中某一台投影机位置发生相对变动，即使是很微小的变动也会对投影画面的整体性产生影响，这就需要再一次调节硬件位置，实施校正过程。在实际应用中这种微小的变动可能会经常发生，所以校正过程会经常进行。

此外这类系统扩展性也比较差，已经很少使用，逐渐被基于软件的自主拼接技术替代。基于软件的自主拼接技术得到了广泛的研究与应用。

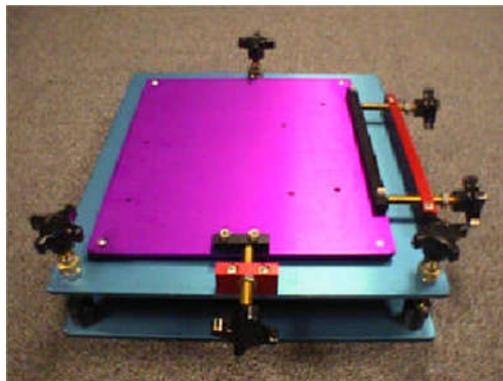


图 1-4 投影机调节底座

Fig. 1-4 Regulation base for adjust the projector

最近几年来数码成像设备的快速发展，出现了用摄像头或者数码相机代替人

眼拍照记录屏幕图像的软件自动校正方法，它属于基于软件的自主拼接的一种。这些方法的核心是利用相机拍照代替人眼观察各台投影机图像之间的相对位置及图像的扭曲变化，形成计算机、投影机、相机的反馈系统。用一个或多个摄像头、数码相机与多台主机、投影机在空间合理配置，各台投影机输出图像有所重叠组成一个整体；相机所在位置能保证所拍照片覆盖整个屏幕，从而将各台投影机的输出图像包含在照片内。根据所处环境提前对相机进行调节使其拍照效果达到最佳水平，投影机投射出具有一定规律的图像，相机拍照记录投影屏幕上的图像信息，基于拍摄的图像所记录的投影机图像的位置、形变信息，借助于相关软件系统，对各台投影机将要输出图像进行几何形状和亮度的调整，从而在屏幕上得到一幅完整正确的图像。

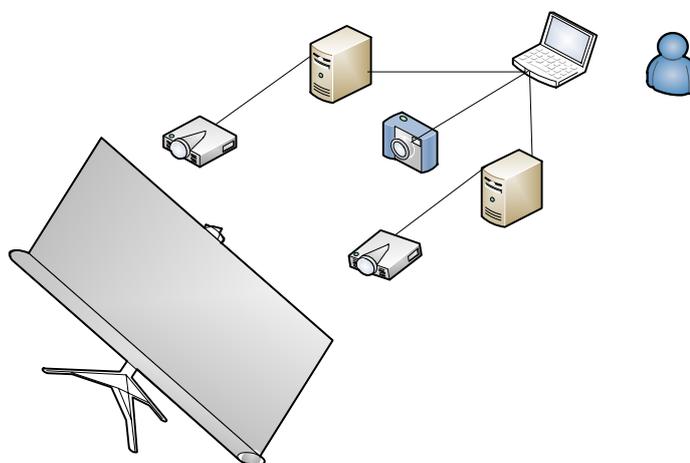


图 1-5 基于相机的多投影拼接系统示意图

Fig.1-5 Multi-projection system based on camera

基于相机的多投影拼接显示系统有如下优点：

(1)硬件环境易于实现。投影机的摆放在大致范围内即可，不需要繁琐的机械调整过程，几何校正通过软件实现，方便快捷。

(2)较高的灵活性。对于投影机数目和使用场景均能灵活应对，例如曲面投影幕。

(3)成本较低。不需要特殊设备来精确定位投影机，不需要专业人员进行安装、维护。

本文主要的研究内容就是基于相机的多投影自主拼接显示系统。基于相机的多投影拼接系统基本构成如图 1-5。构建多投影显示系统的核心工作是几何校正、亮度校正。

系统的几何校正即对投影机输出画面的几何处理。需要进行几何校正的情况

大致有三处，一是由于环境限制投影仪投射出的画面不能垂直于屏幕，导致图像变形；二是非平面投影幕，需要针对屏幕形状对显示图像做相应几何变化，使得观察者最终看到的是正常显示的原图像；三是在多投影拼接显示中根据情况需要对各台投影仪的图像进行适当调整，使得在投影幕上得到一幅完整的图像。校正的主要方式包括投影仪位置和姿态的调整，在投影仪上进行参数设置以对图像进行调整，以及在投影仪之前进行输入图像的处理等几个常用方式。对于常见的平面幕，它的几何校正比较简单，单个投影仪的图像变形一般是由于投影仪相对于屏幕位置的俯仰、倾斜、偏转造成的。由于投影仪投射出的光程产生差异导致了图像发生形变，投影仪的俯仰、偏转的摆放姿态可以导致上梯形和下梯形、左梯形和右梯形的变化结果。倾斜的摆放姿态不会导致光程差，显示结果是图像同步倾斜。

如果无法保证投影仪光线和屏幕垂直，则需要运用“梯形校正”功能对输出图像进行校正，最终屏幕上显示为矩形图像。光学梯形校正和数字梯形校正是目前主要的梯形校正方法。光学梯形校正实施方法是调整投影仪内部的镜头位置，数字梯形校正则通过投影仪内置软件来实现梯形校正。

目前，数字梯形校正已成为绝大多数投影仪具备的基本功能。一般情况，投影仪倾斜角度不太大时，使用数字梯形校正就可以满足要求。如果投影仪倾斜角度较大且对图像位置精度要求较高时，投影仪自带的梯形校正可能达不到要求。特别是在多投影拼接时，经过数字校正得图像可能会带来拼接质量下降的问题。因此最好方式就是保持梯形校正参数归零，投影仪垂直于屏幕放置，所有几何校正需求通过前期图像处理来实现。

在多投影拼接构建过程中，要求相邻投影仪有部分重叠区域。这就需要对每台投影仪的输出图像做合理的处理，使得各台投影仪投射在屏幕上的图像能正确拼接为一副完整的画面。更进一步，如果投影显示系统屏幕为非平面如：球幕、柱面幕，图像在这些屏幕上显示时会发生扭曲，仅靠调节投影仪自身的校正功能则无法满足需要，无论是单台投影仪画面还是多台投影仪共同显示的画面上都无法正确显示原图像。所以多投影系统的几何校正工作尤为重要。

目前几何校正方法主要是基于相机的反馈校正，一般情况下我们把投影平面分为平面和非平面两种形式，大部分情况下投影幕为规则平面，如墙面。非平面包括规则曲面和不规则平面，如球幕，S 墙等。本文所研究针内容对不同投影面情况下所采取的几何校正方法有所不同。

首先简要介绍一下前人研究内容，Raskar 等提出使用一个固定的摄像头进行信息采集，计算相机空间、投影仪空间、屏幕空间的单应性矩阵，从而实现多投

影仪的几何校正输出^{[22][23]}。Y.Chen 提出了使用一个位置可以变动的摄像头拍照记录多台投影机之间的相对位置, 然后进行一系列计算, 在相邻投影机之间应用点匹配、线匹配方法。并提出了一个自动投影机排列算法。该方法适用于投影机数目比较多、摄像头视野范围有限的场合^[24]。H.Chen 提出了基于多个摄像头的投影拼接几何校正方法, 通过建立各个摄像头之间的联系, 得到摄像头、投影机、投影幕之间的几何对应关系, 最终实现几何校正^[25]。在国内孙汉旭等在文[26]中提出了一种多投影几何校正方法, 该方法的核心是在极坐标系中进行纹理贴图, 作者首先采用角等分方法将二维纹理进行网格划分, 然后在三维坐标系中对网格进行贴图, 实现了几何校正, 并在文中也给出了部分校正代码。浙江大学的沈权等人对多投影自主拼接技术做了深入的研究^[27], 降低系统对环境光强度的限制的依赖; 张超对多通道自由曲面的投影技术进行了相关研究^[28]。

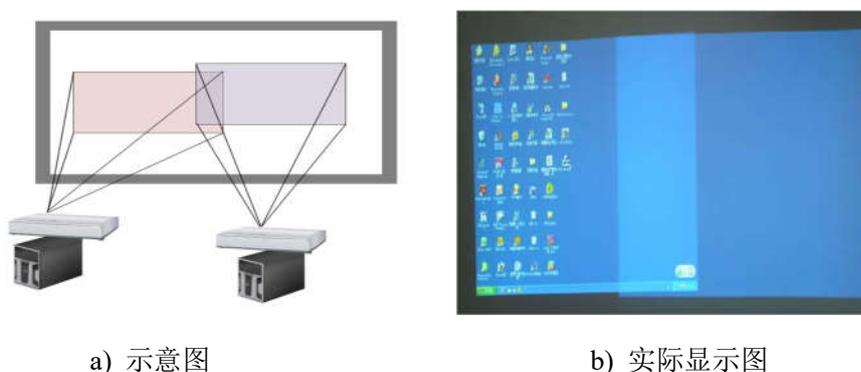


图 1-6 多投影重叠示意图

Fig.1-6 Schematic diagram of multi-projector overlapping

由于在布置投影机时相邻的投影机投影区域有部分重叠, 这就使得屏幕上的某些部分被两台或者多台投影机共同显示, 其亮度会达到单台投影区域的若干倍。重叠区域亮带的出现严重影响了投影的整体效果, 破坏了画面的一致性。因此需要采用合理有效方法对重叠区域图像亮度进行有效降低, 使整个画面亮度实现均匀统一。这一过程也称作亮度校正或者边缘融合^[29-31]。

对重叠区域的亮度校正的核心工作是选取适当的 Alpha 蒙版函数生成 Alpha 蒙版图像, 对相邻投影机输出的图像重叠部分的像素亮度进行有效合理的衰减。使得重叠区域亮度和其相邻区域的亮度差别最大程度减小, 在屏幕上显示的图像亮度得以均匀过渡。如 Raskar 等人利用相机的 HDR(High-Dynamic Range, 高动态范围) 技术对投影机投射在屏幕上的图像进行拍照, 通过分析所拍照片获取投影图像的亮度。然后, 生成一个不同灰度的像素点组成的蒙版图像对重叠区域的亮度进行衰减, 实现重叠区域的亮度校正^[32]。Majumder 等人在文[33-35]中都介绍了各自对重叠区域亮度校正的处理方法, 关键问题都是如何获取重叠区域的

范围和设置合理的亮度衰减函数。

在国内相关领域,关于亮度校正的研究也有很多。研究比较早的有贾庆轩等人根据投影画面在屏幕上的成像差异,提出了直接逼近算法、二次曲线衰减算法以及 μ 比例修正算法,实现了多投影显示系统重叠区域的亮度校正^[36]。长春理工大学的黄少梅提出一种亮度归一化的多投影重合亮度校正方法,实现了输出图像的亮度一致。同济大学的杨国平等对传统的融合拼接技术进行总结的基础上,对投影仪投射阶段亮度非线性变化的校正进行了分析,并探索引入 Gamma 校正方法^[37]。

对于多投影拼接系统,俞凌云等在文[38]中论述了大屏幕系统应用软件开发相关内容,设计了主控机/客户机架构和同步控制技术,实现时间同步和帧同步。陕亮在文[39]中论述了基于云计算的多投影系统项目管理与安全设计,将当前热门的云计算概念引入到多投影拼接系统的构建与管理上。他提出运用相关云平台系统提供的功能来实现多投影系统的在线授权、监控、管理,利用云平台海量存储能力以及强大的计算能力,实现所需文件的远程在线上传下载与管理,这种方法可以有效解决用户存储能力不足的现实问题。随着云计算、互联网+等技术与理念的深入探讨,把先进的互联网技术与多投影拼接系统结合起来实现资源融合、远程控制等功能,这将是一个重要的研究方向。

1.3 本文的主要内容及组织结构

基于相机的多投影仪拼接显示系统有较大的灵活性和较高的应用价值,本文主要对基于相机识别特征点的多投影拼接的几何校正和亮度校正问题的相关原理、算法进行研究,并构建多投影实验系统进行具体实验。本文所研究的多投影校正系统的屏幕样式包括平面和非平面两种方式。由于平面投影和非平面投影画面变化差别较大,本文对两种情况下的几何校正问题分别进行了研究、并有所创新。同时进行实验,用具体实验来验证我们针对不同投影面提出的几何拼接校正方法是否可行。借助摄像头和相机的反馈,本文用不同的方法首先对平面投影和非平面投影实现了几何校正,然后实现重叠区域亮度校正,进而构建了投影拼接显示系统。本文主要分为以下几个部分:

第1章:绪论。介绍本文的研究背景、研究意义、研究现状。首先介绍了基于多投影拼接的大屏幕显示系统有较大的社会需求和较大的研究意义。然后介绍了大屏幕显示系统的不同实现方法并加以分析比较。然后对多投影拼接系统的研究现状和发展进行了论述。最后,简要的给出了本文各章节的主要研究内容。

第 2 章：平面几何校正。在本章中详细的介绍了基于特征点识别的应用于平面投影幕的投影拼接几何校正方法。在借鉴前人思想的基础上，本文进行了较大的改进。首先分析平面几何拼接图像变形不大，提出可以用较为稀疏的大面积特征点进行投影，那么就可以用廉价的 USB 摄像头就可完成拍照任务。然后，基于 USB 摄像头功能有限、拍照质量不高，提出了拍照后照片去噪、处理优化的方法。最后，在识别照片上特征点时提出了像素点的四邻域扫描方法，在扫描像素点的同时计算特征点坐标。

第 3 章：基于结构光编码的曲面投影几何校正。本章中几何校正的对象是曲面投影幕，针对图像在曲面投影幕的形变较大，用零散的特征点无法详细的刻画图像信息，本章把三维重建中用到的结构光编码方法应用到曲面投影拼接几何校正中。在本章中将对相关原理方法进行详细论述。

第 4 章：亮度校正。几何校正完成后，在投影仪的重叠区域由于由两台投影仪共同显示，会出现亮度较高的“亮带”，影响了最终显示画面的视觉效果。如何合理有效的消除重叠区域的多余亮度，并不是简单的将每台投影仪亮度衰减一半，在本章中我们运用 Alpha 蒙版图像衰减亮度方法并精心的选择了亮度衰减函数。

第 5 章：投影拼接系统硬件集成。在论述了投影拼接系统相关原理方法后，就需要构建相关系统予以实施验证。由于投影拼接系统应用时的核心部件是投影仪，在本文课题开展的同时我们对投影仪的相关信息进行了调研，本章中将给出部分论述。最后将给出我们构建的多投影试验平台的主要硬件信息。

第 6 章：投影拼接软件系统。程序编写是本课题的又一核心工作。前面几章所论述的所有原理方法均需要代码实现，有了正确运行的程序载入到硬件系统中才是一个完整的投影拼接系统。在本章中主要论述投影拼接的软件编写相关内容。投影拼接软件系统不是一个简单的代码的编写，需要合理的规划，方便程序编写时代码修改和以后版本升级。首先给出了软件系统的设计原则，然后参考整个系统的功能流程，对软件系统进行了合理的模块化分。最后针对每个模块的代码实现进行了简单的论述。

第2章 基于特征点编码的平面几何校正

2.1 引言

几何校正主要解决屏幕上所显示的多台投影仪的画面正确显示与拼接问题。例如一条直线被分割为若干部分发送给不同投影仪进行投影，那么通过几何校正后的投影仪图像最终显示在屏幕上，观众看到的仍为一条完整正常显示的直线。在基于相机的多投影拼接系统中，各台投影仪的投影画面不需要严格对齐，相对位置一般能满足屏幕上的各个投影图像之间有一定的重叠区域，没有覆盖不到的“空洞”即可。投影屏幕的类型有：一般平面幕、平面的组合幕如墙角、曲面幕如鸟巢的环形幕和天象厅用的球幕等。

在本章中我们主要对平面幕及平面组合幕几何校正的算法原理进行研究。本章中所采用的几何校正方法遵循基于相机的软件校正方法的基本规律，但有所改进。我们假设：相机位于观众最理想位置，这样可以省略相机位置和投影幕的对应关系计算，以此为基础，对基本公式进行了简化。最终实现一种合理的、易于实现的几何校正方法。该方法投射一定数目的特征点，计算相对简单，对校正结果要求不是特别精密的情况下比较适用。同时在实施的具体细节上提出了拍照图像前期处理方法和像素的四邻域扫描算法。

2.2 基于相机的软件校正方法

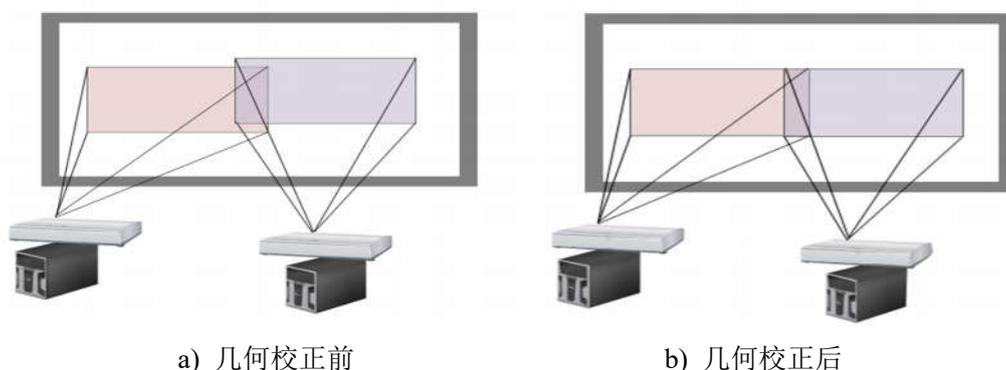


图 2-1 几何校正前后显示对比

Fig.2-1 The contrast before and after geometric correction

我们需要解决的几何校正问题主要包括两个方面，一是单台投影仪画面的校正，二是多台投影仪画面的无缝拼接。通过几何校正来实现各台投影仪的输出画

面的改变,最终通过改变后的画面拼接在一起显示在屏幕上时为一幅规则、完整的画面,如图 2-1。

基于相机的软件校正一般思路是通过引入相机拍照作为反馈求出投影幕坐标系的点与每台投影仪坐标系上点之间的几何关系矩阵。分别计算出每台投影仪坐标系的点与相机坐标系的点之间的几何关系矩阵、照相机坐标系的点与投影幕坐标系的点之间的几何关系矩阵。几个坐标系定义:投影幕坐标系是指投射图像在屏幕上所处的坐标系。投影仪坐标系,是指原始图像所处的坐标系,也就是图像在计算机内的存储坐标系。相机坐标系,利用相机拍摄屏幕上的图像所形成的照片的坐标系^[40]。各坐标系关系如图 2-2 所示。

一般校正的具体步骤是:首先求取投影仪坐标系与相机坐标系的映射关系矩阵 F ,再确定相机坐标系和投影幕坐标系的映射关系矩阵 H ,最后确定投影幕坐标系与投影仪坐标系的映射关系矩阵 G 。若投影仪 $P_i(1 \leq i \leq N, N$ 为投影仪数目)上一点为 (x, y) ,则:

$$G_{(s,t) \rightarrow (x,y)} = F_{(u,v) \rightarrow (x,y)} \cdot H_{(s,t) \rightarrow (u,v)} \quad (2-1)$$

在实际投影时,使用矩阵 G 的逆矩阵 G^{-1} ,对将要投影的图像进行坐标变换,计算预校正坐标,通过每台投影仪的 G^{-1} 对各自输出图像进行控制,实现在屏幕上正确的拼接显示。

映射矩阵 F 、 H 、 G 的求取,需要投影仪投射特征点,相机拍摄投射在屏幕上的特征点,通过计算特征点在各自坐标系中的坐标值后进行相关计算来求得。根据不同的计算模型可以分为三类:线性几何校正方法、分段线性方法与非线性方法。

线性校正方法是最早使用的校正方法,在针对平面幕的多投影拼接系统中最为常用。用 3×3 的线性矩阵 G 来表述投影仪坐标系和屏幕坐标系的对应关系。在投影幕上按一定规律投影显示一些特征图像,这些特征图像在投影仪坐标系内按照一定规律生成,坐标值已知。然后用相机在固定位置对屏幕上的特征点进行拍照,传回主控计算机进行处理计算,进而计算得到投影仪坐标系到相机坐标系的对应关系。

非线性校正方法与线性校正方法有较大不同,该方法能同时适用于平面投影幕和非平面投影幕两种情况。该方法将投影幕划分为若干曲面。目前贝塞尔曲面法和三次多项式法是非线性校正方法的主要方法。三次多项式法缺点较多,他虽然能消除一部分非线性因素的影响,但是处理精度不够高,无法充分地获取投影仪到相机的对应关系,这种三次多项式方法同样无法应对比他更高阶的非线性因

素的影响。贝塞尔曲面法以复杂的曲面模型为处理单元，和三次多项式法相比贝塞尔曲面法精度更高，但是该方法在实施中需要对目标曲面进行非常细致的划分，在后期的数据处理部分需要进行复杂的计算。

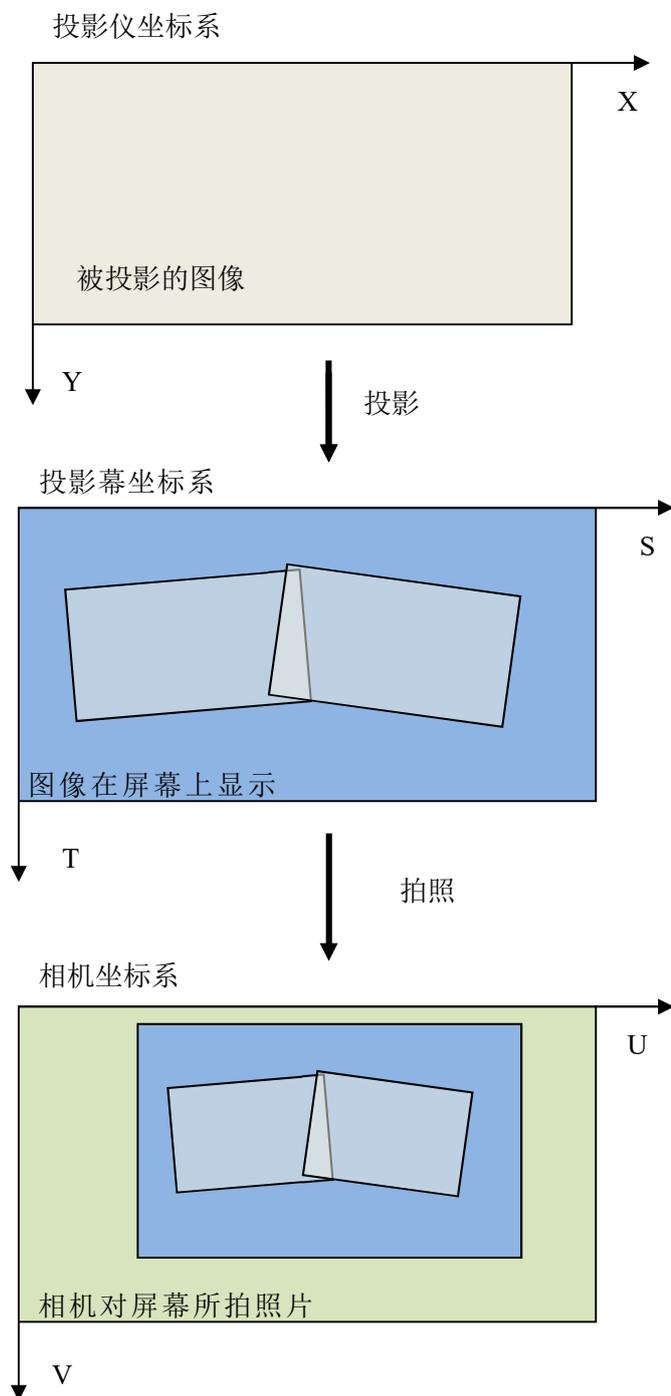


图 2-2 坐标系对应关系

Fig.2-2 Correspondence between the coordinate system

分段线性方法和线性方法相同之处是投射特征点，但是分段线性方法所使用的特征点数目比线性方法多得多。该方法主要使用较多的特征点形成连续的线段

来模拟投影幕上图像形状的变化，因为一段曲线可以看作由无数个小线段组成，通过较多数目的特征点一一对应关系来获得投影仪坐标系和投影幕坐标系的对应关系，不用求取映射矩阵 H 或非线性方法的三次方程，对于复杂的曲面投影幕来说，避免了繁杂的数学计算。在分段线性校正方法中，通过摆放相机在最佳位置使其能模仿观众所在位置，进而可以假设投影幕坐标系和相机坐标系没有相对扭曲，进而省略 H 的求取。则 $G_{(s,t) \rightarrow (x,y)}$ 的计算公式可以简化为：

$$G_{(s,t) \rightarrow (x,y)} = F_{(u,v) \rightarrow (x,y)} \quad (2-2)$$

分段线性方法把相邻特征点组成的三角形网格作为几何校正的基本单元，如图 2-3。它没有像线性校正方法中的一系列的参数，而是把所有特征点坐标值对应关系的组合视为 F 和 G 。然后使用纹理贴图方法把将要输出的图像赋予相邻特征点组成的三角形，实现几何校正。分段线性方法在对图像显示效果要求不太高，同时要求系统构建简便灵活的情况下比较适用。但是该方法要求对所有投射的特征点进行准确识别，对拍照图像处理能力要求较高，在实际的应用困难较多，本文将分段线性方法为基础，探索实现简单方便、廉价但又能满足基本功能的投影拼接方法。

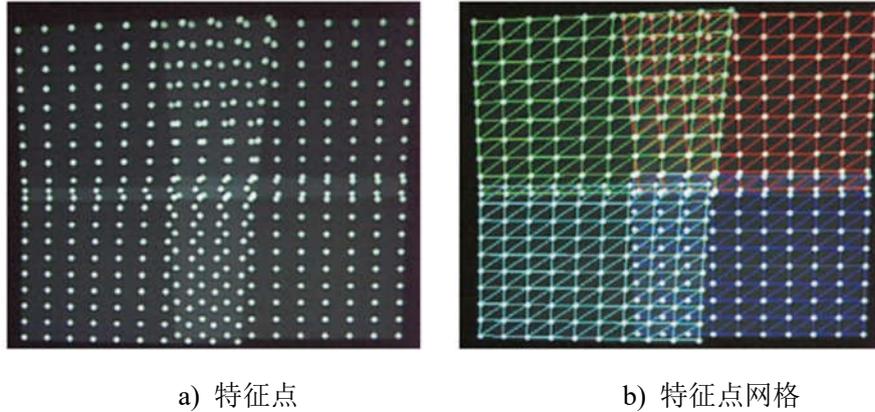


图 2-3 特征点和校正时使用的三角网格

Fig.2-3 Feature points and triangular mesh in calibration

本章和第 3 章将对基于相机的多投影拼接系统分段线性几何校正的原理、方法进行详细的分析与论述，并利用两台投影仪进行实验。同样用投影仪编辑显示一定规律的特征点图像投射在屏幕上，利用摄像头、相机对投影仪投射出的特征点图像进行拍照。不同的是针对平面投影幕和曲面投影幕不同的形变特性，本章和第 3 章分别给出了不同的特征点编辑算法。平面投影幕的图像变化一般都是线性或者分段线性的，用数目不多的特征点就可以刻画出投影仪的形变、投影位置信息。同时特征点可以显示的很大，用廉价的摄像头就可以拍出满足处理要求的

图像。但是对于形变较大的曲面幕，需要投射较大密度的特征点图像才能比较合理的刻画出投影图像在曲幕上的位置形状信息。通过所用的编辑特征点算法，使投影仪投射的特征点和照片上的特征点进行一一对应，因为照片上这些特征点的位置坐标变化可以代表投影幕形变信息、各台投影仪的投影范围、投影相对位置，通过分析、计算对投影仪将要输出的图像进行分段线性预校正，在最大程度消除几何失真的前提下，实现2台投影仪输出的图像准确拼接，在屏幕上呈现出一幅正常显示的完整图像。该方法适用于目前市场上普通的投影仪、摄像头、数码相机。操作简单，可以扩展，方便灵活。

2.3 平面投影幕的分段线性几何校正方法

2.3.1 几何校正算法流程

屏幕坐标系、投影仪坐标系、相机坐标系之间对应关系的正确求取是几何校正能否完成的关键。对于方法之一的分段线性几何校正方法来说首先需要在投影仪坐标系中较大密度、按一定规律生成坐标已知的特征点图像并把他们投影在屏幕上，然后用相机拍照并把照片传输给主控机进行图像处理和特征点识别。识别所有特征点后，通过上面所用规律，把投影仪坐标系特征点和相机坐标系特征点一一对应起来。特征点的一一对应关系和在各自坐标系中的坐标值作为几何校正的数据在基础，共同构成了 $F_{(u,v) \rightarrow (x,y)}$ 。最终通过纹理贴图的方法对各台投影仪将要输出的图像进行预校正。

几何校正算法流程如下：

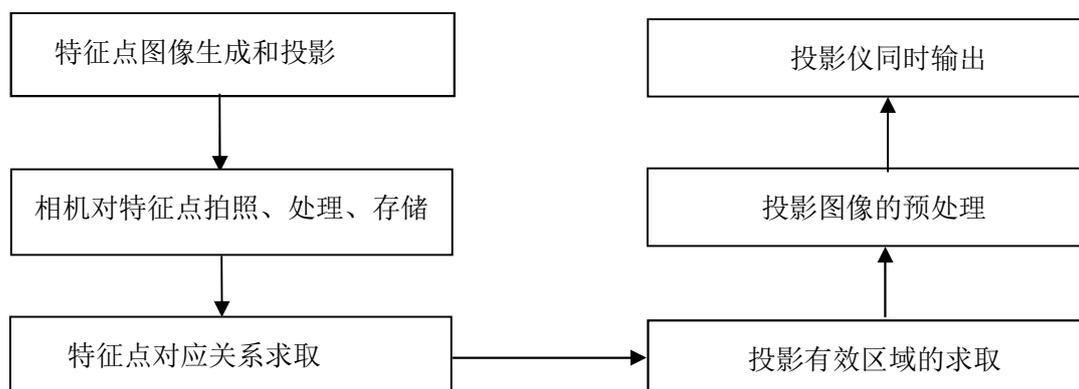


图 2-4 几何校正算法流程图

Fig.2-4 Geometric correction algorithm flowchart

2.3.2 特征点图像生成和投影

特征点图像的生成和投影是几何校正的重要环节之一，因为合理的特征点编码算法和特征点类型关系到后面特征点的提取、对应关系求取等步骤。一般特征图像显示格式为：纯黑背景和纯白特征点图像。特征图像的形状有：圆点、棋盘格交点等，如图 2-5 所示。通过相机拍照特征点图像，然后通过图像处理特和征点识别，建立 $F_{(u,v) \rightarrow (x,y)}$ 。

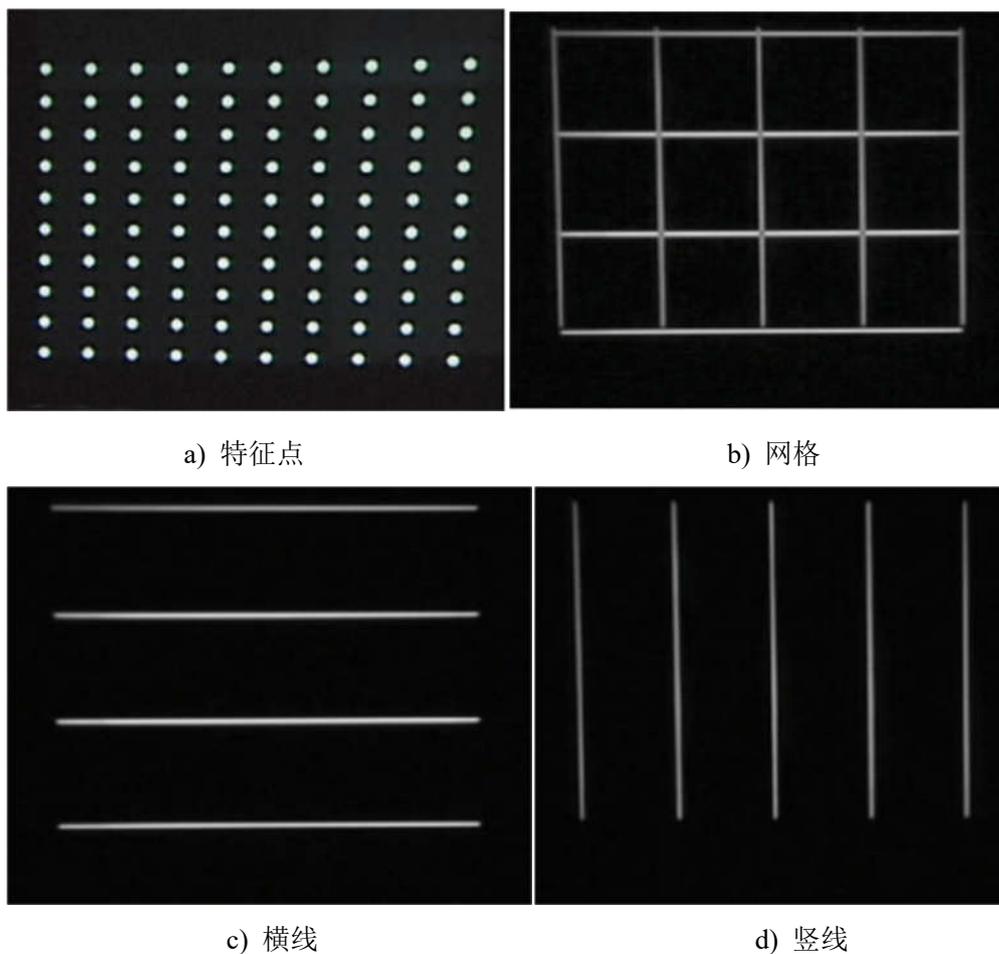


图 2-5 特征点图像举例

Fig.2-5 Examples of feature points in different formats

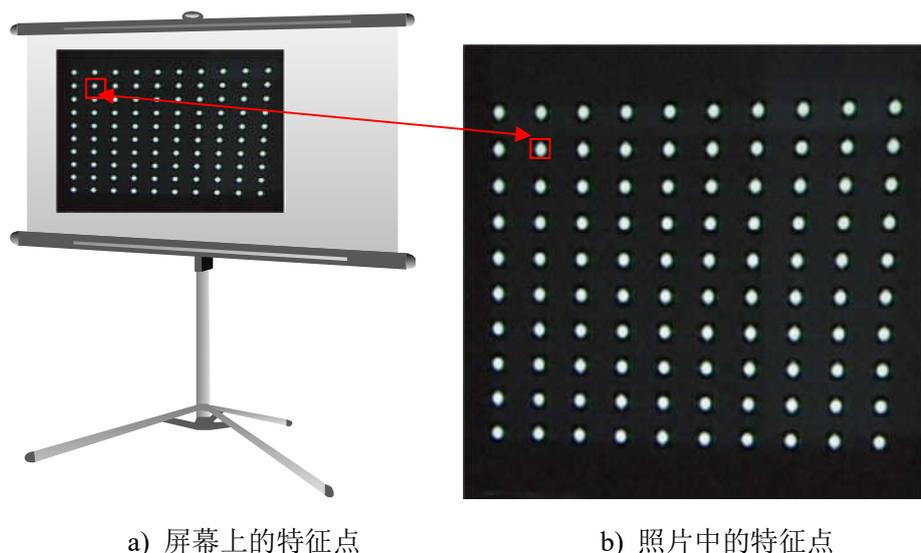


图 2-6 特征点对应关系

Fig.2-6 Correspondence between feature points

我们选用图 2-5a)中白色圆点作为特征点，接下来的关键问题是如何生成、显示特征点，使得投影仪坐标系中的特征点和相机所拍摄的照片上的特征点能准确的一一对应，为投影仪坐标系和相机坐标系对应关系的求取做好基础。举例来说，投影仪投射在屏幕上的第二排第二列的点，需要找到在相机拍摄的照片中它的对应点，如图 2-6 所示。对于人眼来说非常容易，我们可以通过很多位置信息表述来限定特征点位置，但是于对计算机来说该如何对应？

因为计算机系统所能识别的为 0 和 1，所以我们运用二进制编码算法对所有特征点进行编码投影。在这里以 10×10 数目的特征点进行举例。首先，从投影仪坐标系原点开始，从左到右对这 100 个特征点定义一个编号，0—99。那么，这些特征点也对应一个二进制的编号 000 0000—110 0011(99 的二进制表示为 110 0011)。每个特征点所对应的二进制数是唯一的，那么这些特征点也唯一对应一个 0 和 1 的组合排列。如第二排第二列的特征点十进制编号为 11，其二进制 0 和 1 的组合为 1011；第八排第九列对应十进制编号为 78，二进制组合为 1001110。如图 2-7 所示。

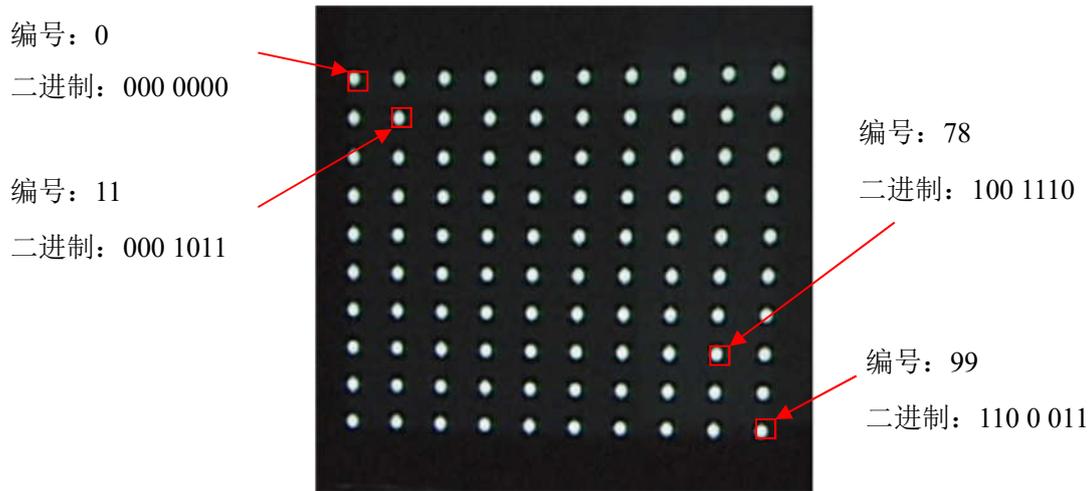
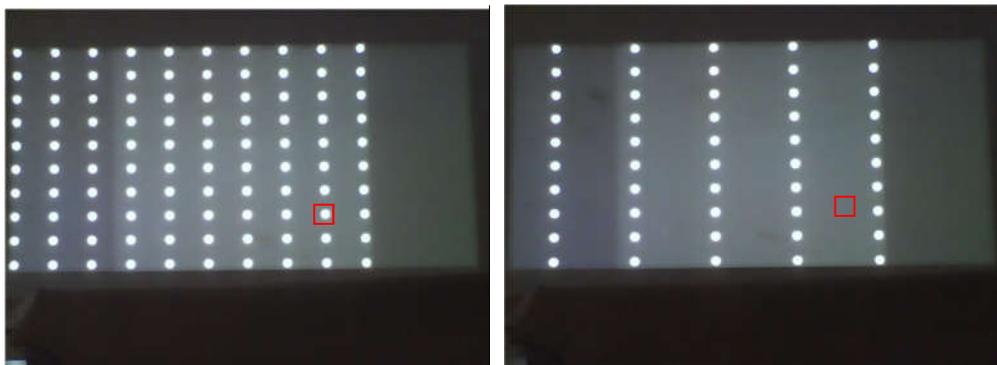


图 2-7 特征点和其二进制序列

Fig.2-7 Feature point and its binary sequence

每个特征点对应唯一的二进制数，上面图像可以用 7 位的二进制数表示所有特征点。如果 0 表示“不显示”，1 表示“显示”，那么所有特征点都将对应一个唯一的“不显示”和“显示”的组合。定义特征点数目为 N ， N 所对应的二进制数的位数为 m ，所有特征点都转化为 m 位二进制数表示。有了上面的铺垫，我们定义特征点的显示规律如下：第一幅图像首先显示所有特征点其编号为 0，然后从右边第一位起，每一位对应一幅特征点图像，编号为 1— m ，共投影显示 $m+1$ 幅图像。如果某一特征点编号在该位为 1，则该特征显示，如果为 0 则该特征点不显示。例如：编号为 78 的点，二进制组合为 1001110，则编号为 0、2、3、4、7 的图像中该特征点显示。其显示规律如图 2-8 所示。



a) 全部显示

b) 不显示

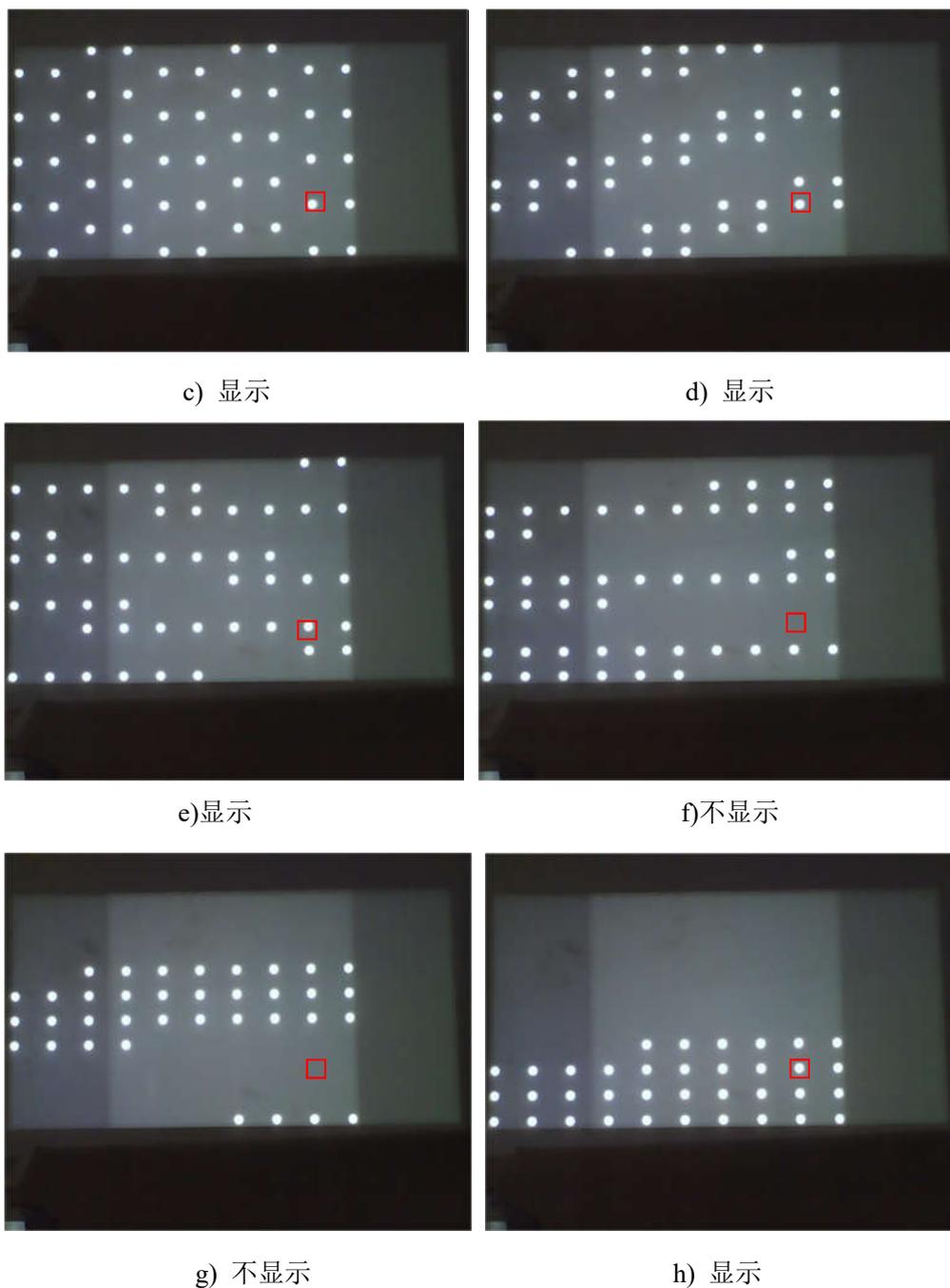


图 2-8 特征点显示规律

Fig.2-8 Feature point display rule

通过识别照片上特征点，分析所有点的显示规律，可以反推出每个特征点的二进制号码，则可实现屏幕空间和相机空间特征点的一一对应。

2.3.2 驱动相机对特征点图像进行拍照

投影仪每次投射一幅特征点图像后，需要主控机驱动摄像头进行拍照，使得相应的特征点规律在照片中也得以体现。在这一过程中，对于硬件摄像头或相机

来说，我们需要编写适当的程序实现以下基本功能：摄像头自动拍照；所拍照片的处理；保存特征点照片并以相关编号命名。

在本步骤中主要运用 OpenCV 图像视频处理库进行编程来实现相关功能。OpenCV 的全称是 Open Source Computer Vision Library，是一个开放源代码的计算机视觉库。OpenCV 在 1999 年由英特尔公司开发，可以在商业和研究领域中免费使用，OpenCV 目前在工业界以及科研领域广泛采用。

首先采用 OpenCV 相关函数编写一个 Camera 类，在 Camera 类定义相关函数 StartCamera()、GrabFrame()、StopCamera()、SaveImage()实现打开相机、拍照、关闭相机、存储等具体功能。代码实现部分将在第 6 章软件设计部分进行叙述。

在编辑特征点时，为了便于识别特征点规定了特征点的显示方式为纯黑背景(亮度 0)和纯白(亮度 255)的特征点。理想状态下，分析拍照所得的特征点照片时，亮度为 255 的像素区域就可以认为是特征点。但是实际进行投影校正时，我们拍照所得的特征点照片并不是纯黑、纯白的图像，如图 2-9。在相机调节合理的前提下对拍照质量产生影响的情况大致有三种：1、投影仪之外的环境光线的影响；2、相机视野范围内其他物体反射投影仪光线形成的噪声点；3、投影仪在投射纯黑图像时也会有部分光线输出。在图 2-9 中左右两侧投影仪均有光线输出，导致特征点的背景不是纯黑。这些因素均会对下一步的特征点识别产生影响，导致特征点数目、位置等信息的不正确。为了避免这些不良结果，需要采取相应措施使得外界环境影响降低到最小。在实验前，要遮蔽环境中所有外界光源，同时合理布置实验设备，使相机视野范围内没有其他物体的反射光线。这些措施可以尽可能减少周围环境的影响。但是对于不能消除的其他影响则需要采取图像处理的方法对所拍照片进行处理，使所拍照片也出现特征点为纯白，背景为纯黑的效果。

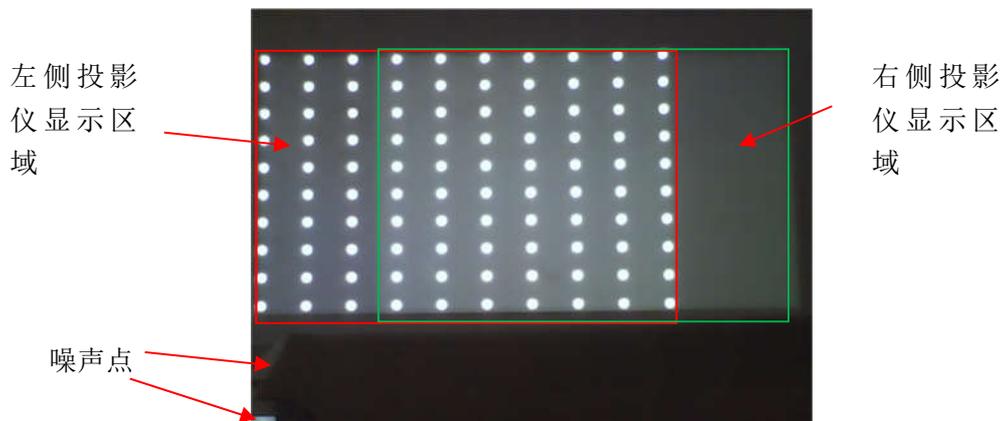


图 2-9 实际所拍照片

Fig.2-9 Photographs in actual

即使有外界环境光线的影响和投影仪的“漏光”现象，多数情况下在相机所

拍的特征点照片中，大多数特征点区域的亮度仍会大于其他区域的亮度，特征点部分和非特征点区域亮度会有所差异。所以在这里采用针对亮度的阈值分割法对图像进行处理，实现纯黑纯白的效果。该方法的基本原理是：通过设定不同的亮度边界值，把所有像素划分为不同的类别。阈值分割方法处理图像是数字图像处理中常用方法，该方法的优点是比较好理解和编程、计算过程简单、性能可靠。图像中目标部分和背景部分处于不同灰度时较适合用该方法，尤其是灰度差别较大时结果比较理想。在程序编写中利用 OpenCV 相关函数读取相机所拍摄的照片，遍历照片上所有像素点，选取合理阈值对所有像素进行二值化处理，尽可能的使特征点区域亮度为 255，其他区域亮度为 0。图像处理完成后，进行保存。如图 2-10。

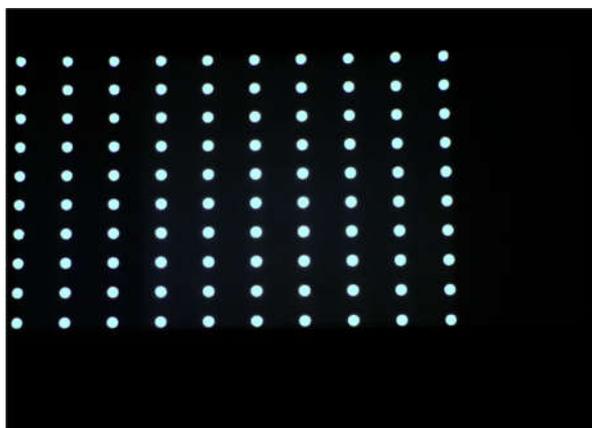


图 2-10 阈值分割后的特征点图像

Fig.2-10 Photographs after thresholding

2.3.3 特征点对应关系求取

试验环境的合理布置和对特征点照片的前期处理都是为了便于特征点对应关系的求取。在本步骤中，需要遍历所有像素点，找出亮度值为 255 的像素点。由于每个特征点由若干像素组成，我们需要判断哪些像素点组成了一个特征点，并通过计算这些像素点坐标平均值来获取特征点在相机坐标系中的坐标值。同时根据所有特征点图像中特征点显示或不显示的先后顺序和次数反推出特征点的二进制编号，从而把投影仪坐标系内特征点和照片坐标系的特征点准确的一一对应。所有 N 组特征点在各自坐标系中坐标值得对应关系的组合就组成了 $F_{(u,v) \rightarrow (x,y)}$ ，进而可得 $G_{(s,t) \rightarrow (x,y)}$ 。

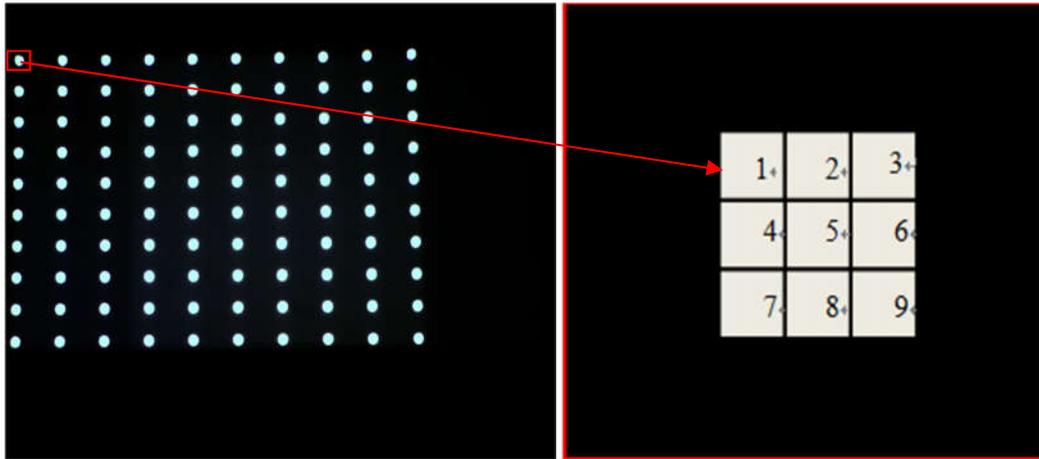


图 2-11 特征点的组成示意图

Fig.2-11 Schematic diagram of feature points composition

对于一幅处理后的特征点照片，如何快捷、高效、准确的识别出亮度为 255 的像素点并判断哪些像素点组合成了一个特征点是本步骤的关键。特征点组成示意图如图 2-11 所示，通过观察可知，通过相邻亮度为 255 像素的堆集组成了特征点，换一种说法就是如果发现亮度为 255 的像素点，那么和其相邻的像素中也必有亮度为 255 的像素和它共同组成了特征点。在图像处理中，某一像素的上下左右的相邻像素称为该像素的四邻域。根据特征点图像所存在的像素分布规律，我们提出了针对特征点的像素四邻域扫描算法，在遍历所有像素点来寻找亮度为 255 像素的同时判断组成特征点的所有像素，并根据这些像素的坐标值计算特征点的坐标值。

四邻域扫描算法步骤如下：

(1)按照所定义坐标系，按照左至右、从上到下的顺序扫描像素点，扫描过的像素点进行标记；

(2)判断像素点亮度是否为 255，是的话作为主像素点进入下一步骤；

(3)判断主像素点的上下左右四个像素点是否已被扫描过，对未扫描过的像素点依次进行扫描判断亮度是否为 255，是 255 的话，对这些像素点同样进行四邻域扫描，找出亮度为 255 的像素点。同时对被扫描过的点进行标记，避免重复扫描。最终找出和步骤 2 中所确定主像素所有邻近的亮度为 255 的像素。这些像素点一起组成一个特征点；

(4)计算特征点的中心坐标；

(5)重复步骤 1，按坐标顺序扫描下一个未标记的像素。

举例说明，如图 2-11 右侧图像，按照坐标系扫描顺序，首先识别出像素 1 为纯白像素，那么就需要对像素 1 的上、下、左、右四个邻域的像素进行扫描，

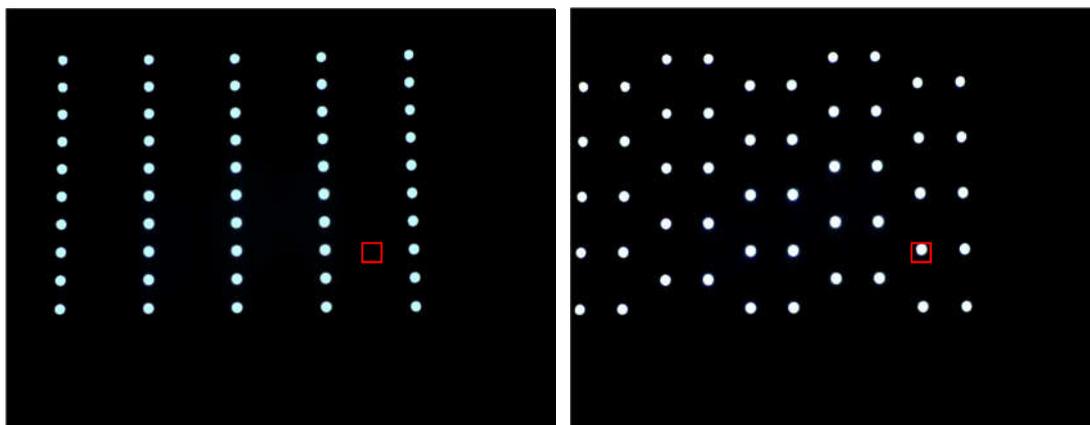
像素 1 的上、左两个像素已被扫描过，直接略过，一轮扫描下来会发现像素 4 和 2 亮度为 255，按顺序，先对像素 4 的四个邻域进行扫描，像素 2 的四个邻域进入队列等待。

扫描过程中会发现像素 7 和 5，然后扫描像素 2 的四个邻域，发现像素 3，因为像素 5 已被扫描过。然后再按发现顺序 7、5、3 对这三个像素的四邻域进行扫描，会发现新的像素 8 和 6。然后按 8、6 顺序进行 4 邻域扫描，发现像素 9，扫描像素 9，因为 9 的邻域 8 和 6 已被扫描，所以扫描像素 9 的四邻域时没有新的亮度为 255 的像素发现，本次扫描结束。继续按坐标像素顺序，进入到下一个未被扫描的像素点，判断亮度是否为 255，是的话重复上面步骤。

通过一次扫描就可以识别出照片内所有特征点，并计算出特征点坐标位置。在实现每一幅特征点照片中提取特征点后，下一步就需要通过特征点照片组来计算出每个特征点的二进制编号。

在投射特征点时首先投射的是全部特征点，通过相机拍照，图像处理，会首先识别并计算出所有特征点在相片中的位置坐标，形成特征点坐标集合。在后续的特征点识别计算中，识别出的特征点的位置坐标和上面集合进行比对，包含在内则说明该特征点在本幅特征点照片中显示。我们就可以根据特征点是否显示及显示与不显示的排列次序计算出特征点的二进制编号。

在 2.2.2 中知道特征点图像共 $m+1$ 幅，编号为 $0—m$ ，用 b 表示每幅图像的编号， $b \in [0, m]$ 。在这里把 1 到 m 幅所有的特征点相片对应一个 m 位二进制数 a ， $a=1 \ll (m-1)$ 。首先把所有特征点的二进制编号 c 置为 0，如果特征点在某幅相片中显示，则 $c=c \& a$ ，把编号为 1 到 m 的特征点相片依次遍历，即可获得 c 的最终值，则 c 就是该特征点的二进制编号。

a) $a=1$ b) $a=10$

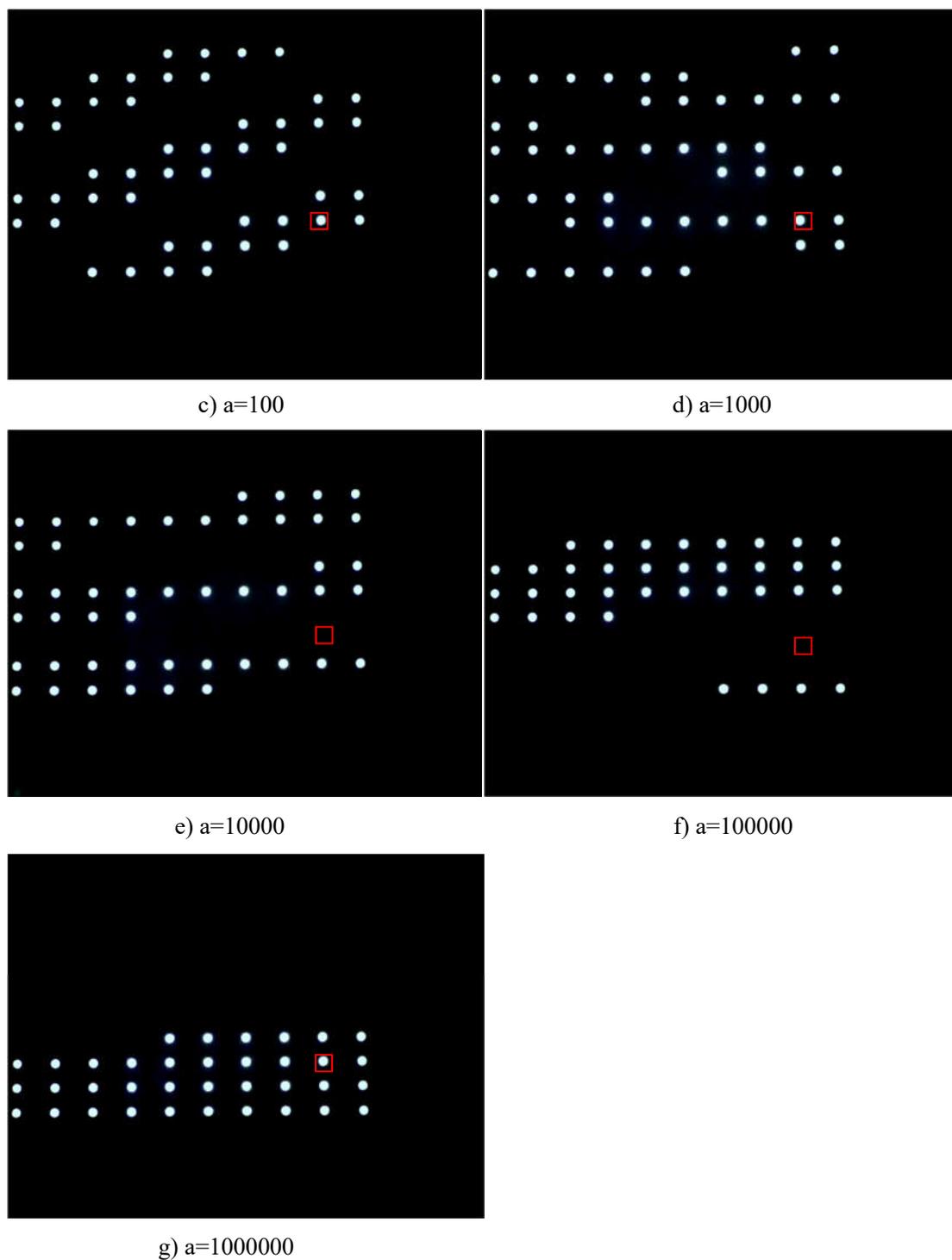


图 2-12 二进制编码求取示意图

Fig.2-12 Schematic diagram of binary coded calculate

继续沿用 2.2.2 节中所举例子进行说明，通过分析上面 8 幅特征点图像来计算出所有 100 个特征点的二进制编号。编号为 1 到 7 的特征点相片所对应的二进制数 a 分别为： $a=1 \ll (1-1)=1$ ； $a=1 \ll (2-1)=10$ ； $\dots \dots a=1 \ll (7-1)=1000000$ 。如图 2-12 所示。

我们任意找了一个特征点，它的显示情况如图 2-12 中红色方框标注，该特

征点在 2、3、4、7 特征点照片中有显示，则它的二进制编号计算方法如下：

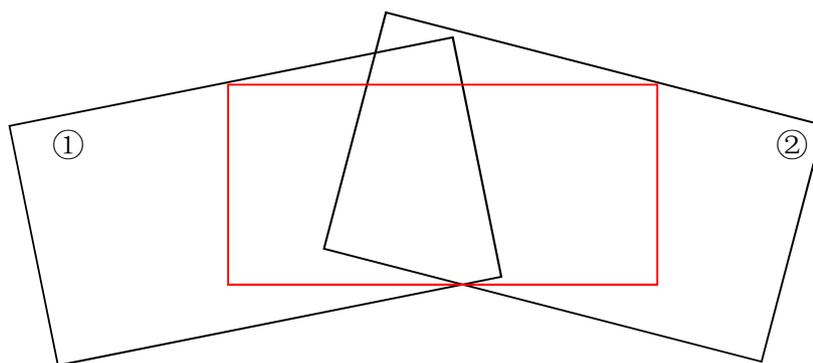
$$\begin{array}{r}
 0000000 \\
 \&\& \\
 0000001 \\
 \&\& \\
 0000100 \\
 \&\& \\
 0001000 \\
 \&\& \\
 1000000 \\
 \hline
 1001110
 \end{array}$$

通过上面步骤，在相机坐标系中的所有特征点就得到一个二进制编号，则投影仪坐标系和相机坐标系中编号相同的点就形成了对应关系。通过分析相机坐标系中特征点相对位置以及相邻投影仪的特征点的位置关系，就可以获得每台投影仪在屏幕上投影变形关系和在屏幕上各台投影仪之间的位置关系，进而判断出投影仪的重叠区域。所有特征点在投影仪坐标系中的坐标值和相机坐标系中的坐标值的对应关系的集合就组成了 $F_{(u,v) \rightarrow (x,y)}$ 。

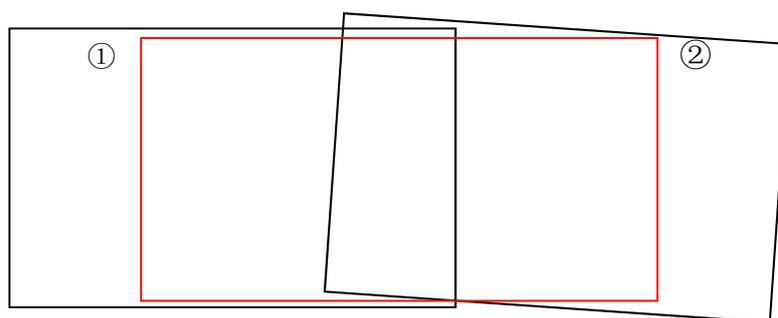
2.3.4 投影有效区域的求取

由于投影仪布置时没有进行机械的严格对齐，所以多台投影仪组成的显示区域是一个由折线组成的多边形区域，为了使平面上输出图像为规则的矩形，所以需要在多边形内部寻找一个最大的矩形作为输出区域，如图 2-13 中间矩形区域。同时需要考虑投影仪输出分辨率的影响，如果单台投影仪输出长宽比为 16:9，那么最终确定的投影画面比例也一般为 16:9，以确保输出画面的协调、完整。当然，这种要求在某些情况下会造成投影区域的损失，所以一般在布置投影仪时也尽量使各台投影仪画面比较整齐，这样可以最大程度的增加有效投影区域的面积。如图 2-13 的 a)和 b)的对比。

通过每台投影仪投射特征点和相机拍摄后的提取后，因为所有投影仪特征点都在同一个相机坐标系内，通过较大密度的特征点所提供的坐标信息就可以分析出每台投影仪所投影的范围、投影图像的形变信息、相邻投影仪的重叠情况。根据相关信息，我们就可以在两台投影仪范围内画出一个符合长宽比要求的最大内接矩形，记录矩形边界坐标值。



a) 投影仪摆放比较不规则



b) 投影仪摆放较为规则

图 2-13 最大投影区域求取

Fig.2-13 The maximum projection area calculate

2.3.5 投影图像的预处理和输出

投影仪坐标系的特征点和相机坐标系的特征点准确对应之后,在准确获取特征点在各自坐标系中的坐标值和有效投影显示区域后,就可以使用 OpenGL 纹理贴图的功能,以特征点组成的三角网格(如图 2-3)作为最小校正输出单元,对每台投影仪的输出画面进行校正输出。

OpenGL (Open Graphics Library)是一个功能强大的专业图形程序接口和底层图形库。他的特点是跨平台、跨语言、功能强大、调用方便,用于二维、三维图像的绘制。OpenGL 是目前应用最广泛的图形 API 之一,它在许多应用场合具较大的优越性。

(1)与 C 语言紧密结合。OpenGL 命令最初就是用 C 语言函数来进行描述的,对于 C/C++语言有一定基础的编程人员来讲,掌握并运用 OpenGL 进行相关程序编写并不是很困难。

(2)强大的可移植性。OpenGL 不仅可以用于 Windows 下 Visual Studio 平台,还可以用于 Unix/Linux 等其它非 Windows 系统的编程平台。OpenGL 的基本命

令都做到了硬件无关，甚至是平台无关。

(3)图形渲染高效。OpenGL 是一个工业标准，他紧跟当前技术潮流，目前市场主流显卡厂家均对 OpenGL 提供强大的支持，OpenGL 凭借其优异的图形渲染性能在市场中一直处于领先地位。总之，OpenGL 是一个功能强大的图形软件接口。

OpenGL 纹理贴图技术也称作纹理映射 (Texture Mapping) 技术，纹理映射技术是指把指定的纹理图像映射到目标物体表面。首先需要在纹理空间上预先指定用于纹理贴图的有效图案，然后建立物体表面空间特征点坐标和纹理图案坐标之间的映射关系，根据纹理空间对应点的值将纹理图案贴附到物体的表面上^[41-44]。简单来说就是利用“贴墙纸”的办法把将要显示的图像贴到物体表面或目标显示区域上，所以又称作纹理贴图。利用纹理贴图技术来绘制显示模型可以较大程度的表现出绘制目标的真实性，通过并不复杂的贴图过程，可以真实高效的绘制出一个实体目标模型。举例来说，我们要具体绘制一座建筑模型的表面，如果采用传统方法来绘制，需要对建筑外观所能看到的所有部件进行逐一绘制。若采用纹理映射，我们就可以对该建筑拍摄清晰照片并以此作为贴图“贴到”所要绘制的区域即可，这种方法同样能还原建筑外观，但是效率高很多。

在几何校正图像处理输出的步骤中，每台投影仪的显示区域就作为纹理贴图的目标区域(物体表面)，将要显示的图像就是纹理图案。在前面步骤中，投影仪坐标系中的特征点和相机坐标系中识别出的特征点在各自坐标系中的坐标值就是我们求取目标区域空间和纹理图案坐标空间映射关系的数据基础。最后，把投影仪坐标系中相邻特征点组成的三角形作为纹理贴图的最小单元实施图像的预校正，如图 2-14。

OpenGL 纹理贴图的实现大致分为四个步骤：

(1)定义纹理。实现函数为 `glTexImage2D()`，该函数的原型如下：`void glTexImage2D(GLenum target, GLint level, GLenum components, GLsizei width, GLsizei height, GLint border, GLenum format, GLenum type, const GLvoid * pixels)`。`target` 含义是纹理映射所用类型，在这里我们用 `GL_TEXTURE_2D` 表示平面状态下的类型；`level` 参数指的是目标纹理图像分辨率技术；`Components` 是选择用于调整和混合的成分；`width` 和 `height` 分别指定纹理图像的宽和高；`Border` 为边界的宽度，必须是 0 或 1；`format` 和 `type` 分别指定纹理映射的格式和数据类型；`Pixels` 指定一个指针，指向纹理数据在内存中的位置。`Pixels` 是核心参数，在这里我们把几何校正后左侧投影仪将要显示的图像图 2-15b)图像读入相关计算机内存，并定义指针赋予 `Pixels` 变量。

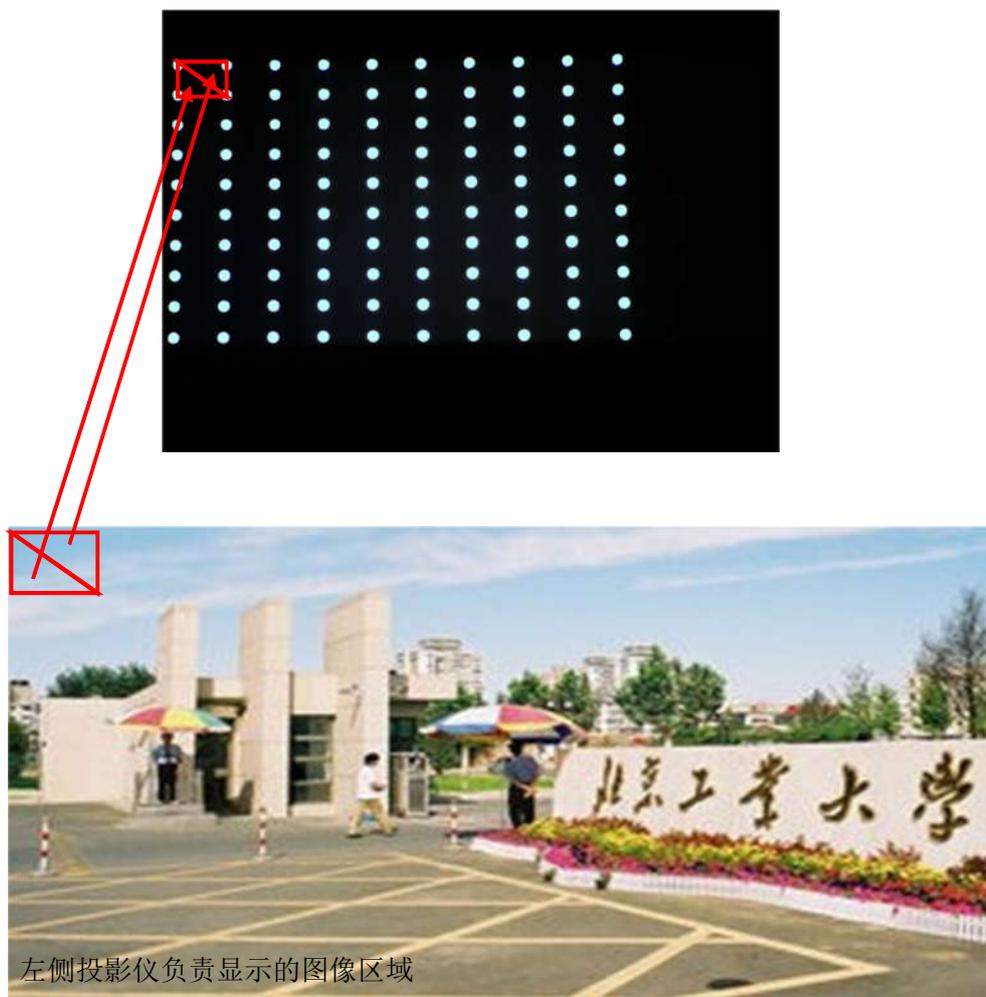


图 2-14 纹理映射示意图

Fig.2-14 Texture mapping schematic

(2)控制纹理。在纹理贴图具体操作时要遵循一定规则，如纹理图像的像素与屏幕上像素间的对应关系，纹理缩放和纹理重复的实现方法等。OpenGL 函数库中具体控制函数为 `glTexParameter()`。

(3)贴图方式。纹理在像素级别的应用有三种方式：贴花方式、调制方式和颜色混合模式。具体实现需要调用函数 `glTexEnv*()` 进行设置。

(4)定义纹理坐标。设定好前面三项后，纹理坐标负责用数据告诉计算机纹理图像和目标区域如何进行对应，进而进行贴图的实施。具体绘制过程以 `glBegin()` 函数标记开始；`glEnd()` 函数标记结束。中间 `glTexCoord2f` 用来指定所需纹理坐标，`glVertex2f` 用来指定目标坐标。在本文论述的几何校正方法以特征点组成的三角形作为纹理贴图的基本单元。在计算得到每个投影仪所负责显示的图像区域后，通过

```
glTexCoord2f();//第一个点纹理坐标;
glVertex2f(); //第一个点目标坐标;
```

```
glTexCoord2f();//第二个点纹理坐;  
glVertex2f()); //第二个点目标坐标;  
glTexCoord2f();//第三个点纹理坐标;  
glVertex2f()); //第三个点目标坐标。
```

的三组使用就可以实现一个三角形区域的纹理贴图，如图 2-14。

通过计算设定 `glTexCoord2f()`和 `glVertex2f()`的合理参数值，在对所有三角形基本单元进行纹理贴图的同时实现几何校正。最终投影校正拼接效果和单台投影仪显示部分如图 2-15。



a) 整体显示效果



b) 左侧投影仪显示效果



c) 右侧投影仪显示效果

图 2-15 几何校正后显示效果

Fig.2-15 Display after geometric correction

图 2-16 为我们的方法对单台投影仪在墙角处投影的校正前后对比。



a) 墙角处几何校正前

b) 墙角处几何校正后

图 2-16 单台投影仪几何校正对比

Fig.2-16 Geometric correction comparison of single projector

2.4 本章小结

本文对原有基于相机的几何校正方法在基本原理的基础上进行改进,实现了一种易于实施、计算简单并能满足一般要求的平面几何校正方法。基于基本假设:相机位于观察者最适宜的位置,进而对相关计算公式进行简化,以特征点组成的三角形为基本校正单元,用纹理贴图的方法最终实现几何校正。在校正细节上,提出进行几何校正计算时首先对拍摄的特征点照片进行有效处理的方法,增加精确度。在扫描特征点时,提出采用特征点的四邻域像素扫描方法,在扫描像素的同时进行特征点的判断并计算出其坐标值。经过实验证明该几何校正方法可行,能达到一定的画面质量要求。

第3章 基于结构光编码的曲面投影几何校正

3.1 引言

在曲面屏幕上投影的投影图像变形和平面幕上的投影图像变形有较大不同，所以在本章单独对曲面投影幕上投影拼接几何校正问题进行单独论述。采用的基本原理与平面的基本原理相同，主要不同是探索把图像处理的三维重构中相关算法借鉴引入到曲面几何校正中，以格雷编码方法增加了特征点的密度，进而更好的模拟曲面上图像的变形特性。

3.2 平面几何校正和曲面几何校正对比

基于相机反馈的多投影几何校正的整体思路就是显示计算机生成并通过与其相连的投影仪投射输出一定规律的特征点图像，通过相机拍摄屏幕上的特征点图像，通过分析计算获取投影仪空间和相机空间的特征点的对应关系。通过分析特征点在不同坐标系中的坐标值，就可以获得每台投影仪投射图像在屏幕上的形变信息、投影仪投影范围、投影仪之间重叠区域等信息，然后用这些信息对预输出图像进行有目的地处理。

对于平面投影幕和由平面组成的特殊变形幕，投影仪的显示区域是由若干直线组成的多边形，投影图像如果有形变一般也是线性的。由两点可以确定一条直线，那么这个多边形区域和每台投影仪的显示区域也可以只用几个特征点和它们之间的连线来确定。如图 3-1，投影仪投射在墙角处，用六个特征点就能大致表述出投影仪图像的变形，在实际应用时我们一般会用多一些的特征点数目如第 2 章提到的 10×10 的特征点组合，是为了更好的模拟图像变形，方便运用纹理贴图，增加输出图像几何校正的可靠性。对于曲面投影幕来说，投影仪的画面在屏幕上的画面为曲边的多边形。对于曲线来说，如果特征点数目太少，模拟得到的则是一段连续的折线，如图 3-2。特征点数目太少，就会直接影响投影拼接几何校正的结果，进而影响图像显示的最终效果。所以我们需要考虑尽量用较最大的特征点密度用于投影拼接。在图像处理中，组成图像最小单位是像素，在本章中我们尝试用一个像素作为特征点单元进行编码，来实现曲面投影的几何校正。当然，对于一个像素来说在实施过程中容易产生误差或者像素损失，在这里运用相关算

法，来最大限度的减小误差，达到几何校正的较好效果。如何设计像素级别的特征点编码算法，并进行有效拍照、识别是核心问题，在这里引入并转化使用三维重构中的结构光编码相关方法进行处理实施。

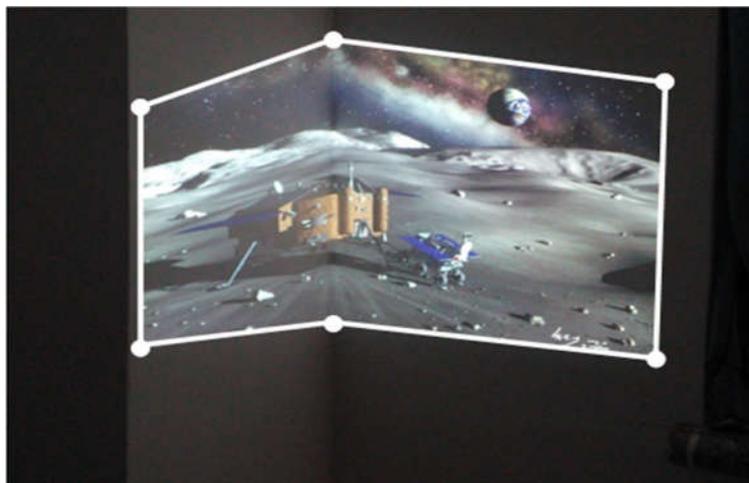


图 3-1 图像在墙角处的变形

Fig.3-1 The image deformation on the corner

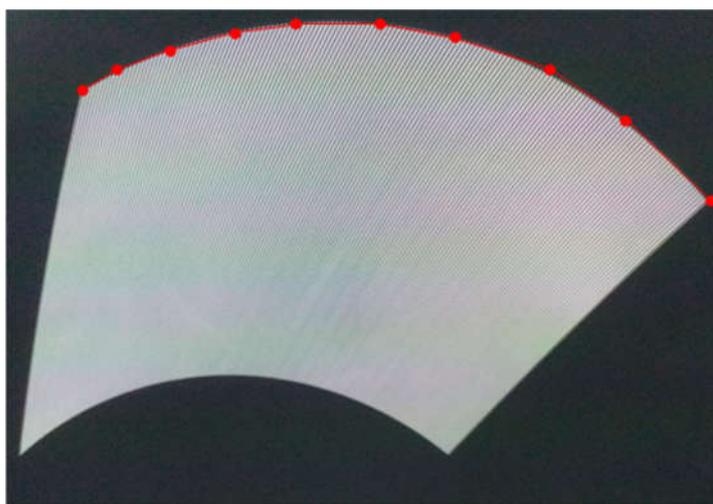


图 3-2 图像在曲面幕的变形

Fig.3-2 The image deformation on surface screen

3.3 结构光编码介绍

三维重构的原理基础是三角测量法。如果要求某一物体的三维信息，就可以让投影仪向该物体投射图像，然后相机拍摄图像，如果图像包含的特征点在各坐标系位置信息已知，那么就可以通过计算还原出物体的三维信息^{[45][46]}。获取投影图像和输出图像相关坐标点的对应关系是三维重构技术的关键问题，结构光方法是处理这一问题的快捷有效的常用方法。

结构光方法是用主机生成某种形式的图案^[47],通过光学系统如投影仪投向物体。在该物体上投影形成图案,然后用摄像机拍摄图像,根据三角法和传感器结构参数得到物体表面深度图像,进一步可以获得该物体表面的三维坐标^[48]。结构光方法投射的图案有多种,根据图案类型划分,可以分为单点法、单线法和编码法^[49]。单点法的优点是准确度相对较高,实施起来简单可靠。单线法的优点是测量效率比单点法高,但是严重的缺点是确定对应关系的难度加大,导致误差增加,影响了测量的准确性。和前两者不同,编码法通过投射按一定规律编码过的图案提高测量速度,同时通过编码解码的应用使识别简化,在保证准确性的前提下有效提高了测量效率,因此编码结构光成为重要的研究方向,应用范围也有较大扩展。

当前的结构光编码方法主要有三种类型:时间编码方法、空间编码方法和直接编码方法^[50]。空间编码方法是向被测物体投射一幅编码图案、通过拍照该编码图案的照片,然后处理分析照片并按照编码规律进行解码,从而获得对应关系。该方法适合于动态测量,但是缺点较多,比如解码难度大、分辨率不高、易受物体表面因素影响等。直接编码对每个被编码的像素都赋予一个不同灰度或者颜色,从而编码图像可由一幅图案承担,图像数目单一容易被噪声污染,所用灰度或颜色的频谱非常宽,必须投射附加的参考图案,才可以快速识别出所有的灰度和颜色。这种方法所用到的图案数目也不多,理论分析该方法比较适合动态测量的情况,能达到理想效果,但是所用的编码图像在实际的应用中识别困难,进而降低了最终结果的准确率。时间编码是按一定规律编辑数幅图像,并按顺序投射到物体表面,然后用数码相机进行拍照记录各幅图像,形成一组有规律的编码图像,然后对该组图像进行处理分析进行解码。这种方法投射多幅图像抗干扰能力强,提高了准确度和分辨率。由于投射数幅图像需要一定时长,所以不适用于运动中物体的测量。但是该方法测量准确、分辨率高的优点正好满足了目前工业应用领域的需求。所以说时间编码方法有较大的研究应用价值^{[51][52]}。

针对时间编码方法的上述优点和我们所构建的多投影显示系统硬件都相对固定的特性,我们把时间编码方法转化引用到曲面多投影几何校正中。按规律编辑若干幅黑白色彩的条纹图像投影到曲面屏幕,同时用相机拍照记录,进一步求取特征点对应关系,这就回归到我们第2章所论述的基本理论上来,不同的是在本章我们要编辑有效的特征点图像最大限度的记录下图像在曲面幕的变形特征。

对投影仪坐标系像素坐标生成格雷编码图像, 首先要把像素的横、纵坐标的二进制码转化为格雷码。为了便于程序编写, 我们设计二进制码转格雷码算法如下: 设某一二进制码 b 的从低到高的各位值用 $b_1, b_2, b_3, \dots, b_n$ 表示。 b 所对应的格雷码 g 的对应位分别为 $g_1, g_2, g_3, \dots, g_n$ 。

转化过程如下:

$$\begin{aligned} g_1 &= b_1 = b_1 \oplus 0 \\ g_2 &= b_2 \oplus b_1 \\ g_3 &= b_3 \oplus b_2 \\ &\dots\dots \\ g_n &= b_n \oplus b_{n-1} \end{aligned}$$

综合上述各式可得:

$$\begin{array}{r} b_1 b_2 b_3 \dots b_n \\ \oplus \quad 0 \quad b_1 b_2 \dots b_{n-1} \\ \hline g_1 g_2 g_3 \dots g_n \end{array} = b \oplus (b \gg 1)$$

综上所述, 普通二进制码转化为格雷码的编程应用公式为:

$$g = b \oplus (b \gg 1) \quad (3-1)$$

\oplus 表示异或运算, 该公式比较简洁明了, 突出优点是适合程序编写, 直接把 b 和 g 定义为变量。读取相关数据直接进行计算就可以。

3.5 格雷编码方法应用于几何校正

我们知道投影仪中的每一个像素可以由其横纵坐标值唯一确定, 每个像素都唯一对应一个二进制坐标值 (x, y) 。我们就针对每个像素的二进制坐标值分别进行编码, 形成一定规律显示的编码图像, 然后用相机进行拍照。那么照片中该投影仪的显示区域也会出现这种规律的编码图像, 即照片中某些像素也符合上面编码规律, 根据编码规律可以计算出照片中这些像素在投影仪坐标系中所对应的像素点的坐标, 则相机坐标中的相关像素点和投影仪坐标系中的像素点实现对应。由于投影仪分辨率和投影仪投影区域在照片中所占分辨率的差异, 投影仪坐标系的有些像素没有找到相机坐标系中确实存在的对应像素, 我们根据其相邻像素所对应相机坐标系像素的坐标值进行插值, 求取其所对应的“虚拟像素”的坐标值。两坐标系中对应的像素点在各自坐标系的坐标值将是我们进行纹理映射的数据基础。

相关原理步骤如下：

(1)获取像素点编码图像。在此以投影仪分辨率为 1280×800 ，像素 $A(x, y)$ ， x 、 y 为二进制数，为例：投影仪分辨率为 $1280 \times 800(10100000000 \times 1100100000)$ ，那么横坐标为 11 位二进制数，纵坐标为 10 位的二进制数。对于横坐标值的二进制数 x ，求取其格雷码 g ，对 g 的每一位 g_i ， $i \in (0-10)$ ，分别编辑一幅二级灰度图像，共 11 幅，规则如下：从左边第一位起如果 $g=1$ ，那么像素 A 在对应的图像中就显示为纯白(亮度为 255)；如果 $g=0$ ，那么像素 A 在对应的图像中就显示为纯黑(亮度为 0)。所有位的对应图像显示完毕后，再依次显示与上述图像的“互逆”的图像。即如果 $b=1$ 则该像素在对应图像中显示纯黑； $b=0$ 则显示为纯白。两次显示顺序相同的图像视为一组“互逆”图像，编号为 0—10 组，第 n 组图像对应 x 的第 n 位。投影仪投射出的画面为一幅幅黑白相间的纵向条带状图像。图 3-4 为示意图。对于纵坐标的二进制值 y 我们做同样处理，得到 10 组横向显示的条纹图像。

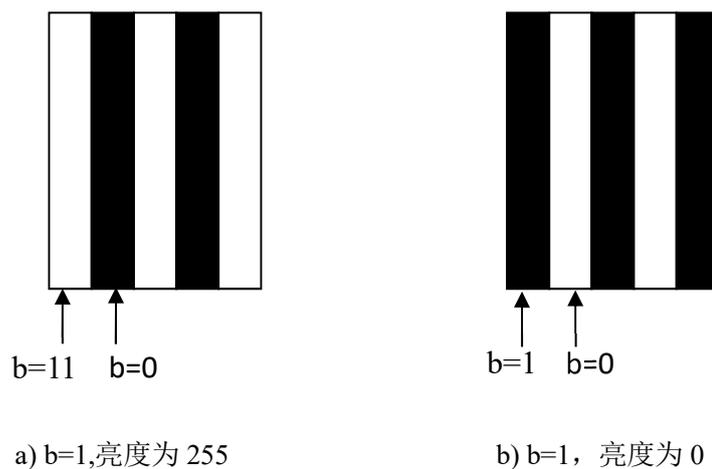


图 3-4 横坐标编码时一组互逆图像示意图

Fig.3-4 A group of inverse image when coding the horizontal coordinate

(2)投射在球幕上的每一幅图像分别用鱼眼相机进行拍照并对照片进行去噪处理。所拍摄的照片用于下一步求取两坐标系中像素的对应关系。实际所拍照片如图 3-5。

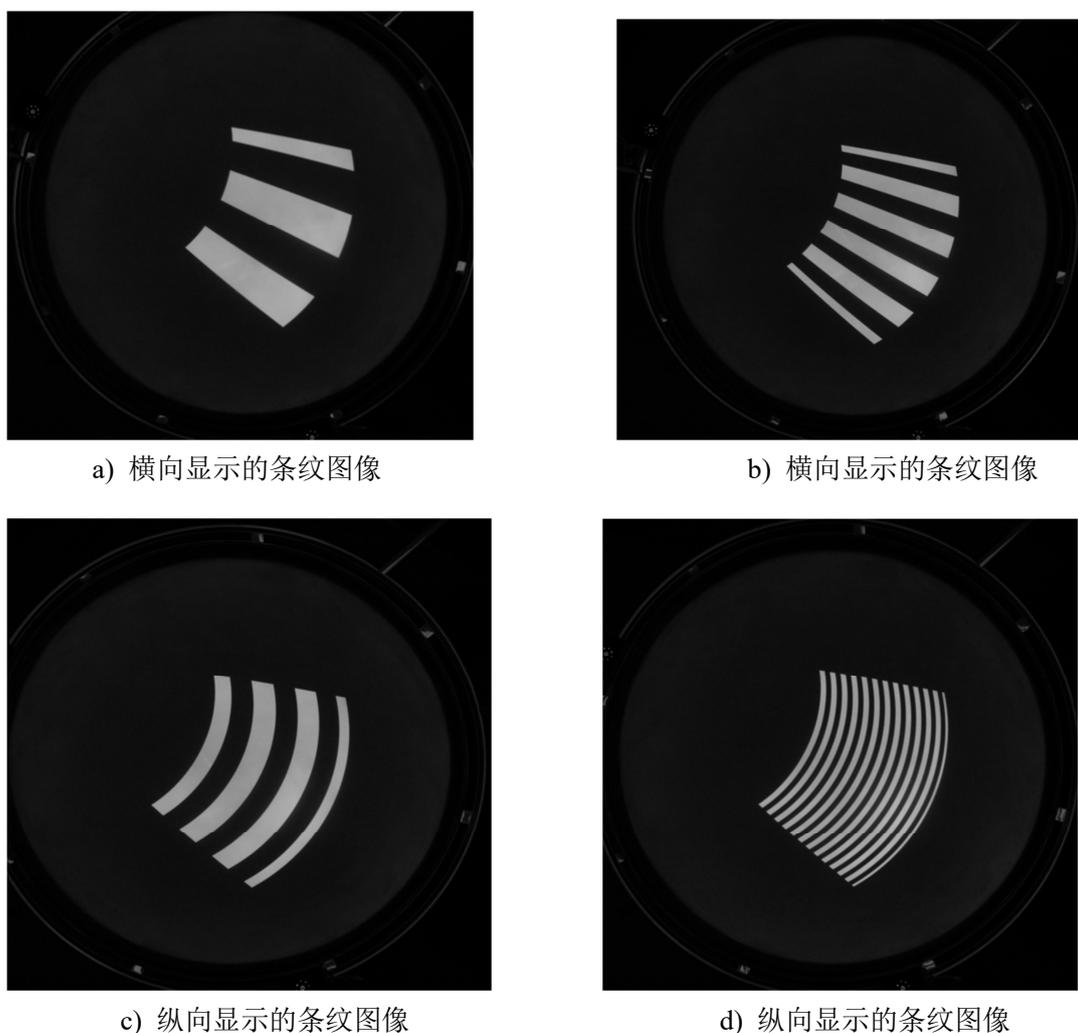


图 3-5 几何校正时的实际图像

Fig.3-5 Image in geometric correction

(3)相机坐标系像素到投影仪坐标系像素对应关系求取。按照步骤 1 的编码规律，我们把投影仪坐标系 (X,Y) 中的像素点到相机坐标系 (U,V) 中的像素点对应关系 $R[(X,Y) \rightarrow (U,V)]$ 分解为横坐标 U 上的对应关系 R_u^u 和纵坐标 V 上的 R_v^v 进行分别求取， R_u^u 和 R_v^v 分别表示一个二进制数。最后再整合为 R ， R 表示由 R_u^u 和 R_v^v 组成的坐标。

首先求取 R_u^u 。 R_u^u 在上述步骤中对应 11 组“互逆”图像，0-10 组图像分别用来求取 u 的 0-10 位上的 0 或 1。遍历每组“互逆”图像照片所有像素，把每组“互逆”图像照片对应像素亮度相减，如图 3-4 中为包含 a) 的照片像素亮度值减去包含 b) 的照片对应像素亮度值。分析差值用于求取对应像素的 R_u^u 。首先令 R_u^u 的所有位为 0。对于第 n 组($0 \leq n \leq 10$)来说，对应像素亮度差值用 Ω 表示，则 Ω 的取

值范围是-255—255。对 Ω 设置合理的阈值 ξ ，则 R_n^u 的表达式如下：

$$R_n^u = \begin{cases} 0, & \Omega < -\xi \\ 1, & \Omega > \xi \\ \text{忽略} \cdot \Omega \text{为其他值} \end{cases} \quad (3-2)$$

那么

$$R_b^u = R_0^u R_1^u \cdots R_{10}^u \quad (3-3)$$

即如果第 0 组“互逆”图像的两幅图像对应像素亮度差值为正且大于 ξ 则 R_0^u 为 1，如果差值为负且小于负的 ξ 则 R_0^u 为 0，吻合步骤 1 中编码规律。对其他组图像做同样处理。 $R_0^u R_1^u \cdots R_{10}^u$ 表示 0 和 1 的一个排列，最终 R_b^u 的值为一个二进制数。

同理可求得：

$$R_b^v = R_0^v R_1^v \cdots R_9^v \quad (3-4)$$

因为在步骤 1 中我们是将像素的二进制坐标值进行格雷编码显示，那么通过上述步骤解码出的 R_b^u 和 R_b^v 需要求出其对应的二进制码 R^u 和 R^v ，从而找到相机坐标系中像素点在投影仪坐标系中对应的像素点，所有对应的像素点坐标值对应关系形成相机坐标系和投影仪坐标系的对应关系。

将格雷码转化为普通二进制码方法如下：

设某一二进制码 b 的从低到高的各位值用 $b_1, b_2, b_3 \cdots b_n$ 表示。 b 所对应的格雷码 g 的对应位分别为 $g_1, g_2, g_3 \cdots g_n$ 。

$$\begin{aligned} b_1 &= g_1 \\ b_2 &= b_1 \oplus g_2 = g_1 \oplus g_2 \\ b_3 &= b_2 \oplus g_3 = g_1 \oplus g_2 \oplus g_3 \\ &\dots\dots \\ b_n &= b_{n-1} \oplus g_n = g_1 \oplus g_2 \oplus g_3 \cdots g_n \end{aligned}$$

因为：

$$g_1 g_2 g_3 \cdots g_n \longrightarrow g \gg 0$$

$$g_1 g_2 g_3 \dots g_{n-1} \longrightarrow g \gg 1$$

$$g_1 g_2 g_3 \dots g_{n-2} \longrightarrow g \gg 2$$

.....

$$g_1 g_2 \longrightarrow g \gg (n-2)$$

综上所述，格雷码转为二进制码的编程应用公式为：

$$b = \bigoplus_{i=0}^{n-1} g \gg i \quad (3-5)$$

相机坐标系中像素到投影仪坐标系像素对应关系为：

$$R = (R^u, R^v) \quad (3-6)$$

这里 R 表示为一个二进制坐标。对应关系可以理解为相机坐标系中的像素在投影仪坐标系中所对应像素的坐标值。根据步骤 1 中编码规律，遍历相机坐标系的所有像素后，对于不符合上述关系的像素进行忽略，只取照片中这台投影仪显示区域的像素。则在相机坐标系中该投影仪显示范围内的所有像素均对应一个 R 。如果某一像素 (u, v) 的 $R = (R^u, R^v)$ 与投影仪坐标系某一像素二进制坐标值 (x, y) 相等，则两像素形成对应关系。在本步骤完成后，在照片中该投影仪投影范围为内大部分像素均在投影仪空间中找到对应的像素，两坐标系中像素坐标值形成对应关系 $(x, y) \rightarrow (u, v)$ 。

(4)用双线性插值法求取剩余特征点对应关系。根据公式(3-2)可知，当 Ω 不在所设定的范围内时进行了舍去，最终结果是相机坐标系中部分像素没有在投影仪坐标系中找到对应的像素点进而形成对应关系。这种情况在第 2 章所叙述的平面几何校正中是不允许的，投影仪投射 100 个特征点，则在相机照片中也必须识别出 100 个特征点，否则程序报错。因为平面情况下特征点由许多像素组成面积较大容易识别，但是在曲面几何校正中我们把相机图像中投影仪相关范围内所有像素点作为特征点进行识别，对于一个像素点来说出现识别误差的可能性是非常大的，所以在这里我们允许未识别的像素点的存在，并引入双线性插值方法计算出该像素点在投影仪坐标系中对应的像素坐标。

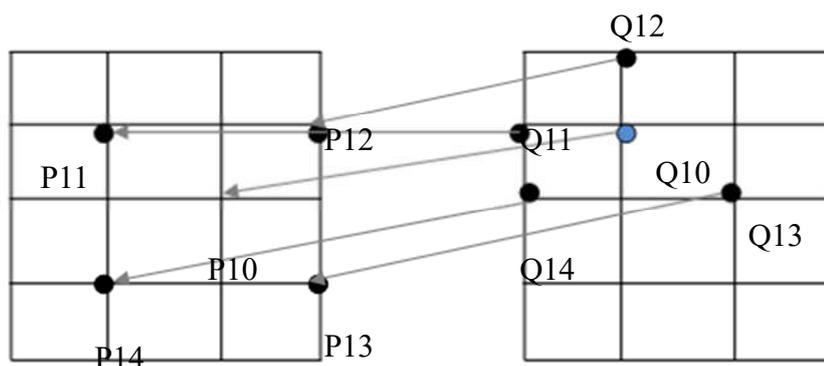


图 3-6 双线性插值法示意图

Fig.3-6 Sketch of bi-linear interpolation

双线性插值，又称为双线性内插。在数学上，双线性插值是有两个变量的插值函数的线性插值扩展，其核心思想是在两个方向分别进行一次线性插值。例如我们想得到未知函数 f 在点 $A = (x, y)$ 的值，假设我们已知函数 f 在点 A 四周的点 $B11 = (x1, y1)$ 、 $B12 = (x1, y2)$ 、 $B21 = (x2, y1)$ 以及 $B22 = (x2, y2)$ 的函数值，那么就可以通过这四个点的插值估算出函数在点 A 的函数值。双线性插值在本章中的应用示意图如图 3-6，左右两侧图像的的点形成某种对应关系，已知点 $Q10$ 附近的四个坐标点 $Q11$ 、 $Q12$ 、 $Q13$ 、 $Q14$ 已知，并已知 $(P11, Q11)$ 、 $(P12, Q12)$ 、 $(P13, Q13)$ 、 $(P14, Q14)$ 形成对应关系，并已知 $P11$ 、 $P12$ 、 $P13$ 、 $P14$ 各点坐标值，要求 $Q10$ 在左侧图像中对应的点 $P10$ 的坐标值，那么用类似方法我们就可以以较小的误差估算出点 $P10$ 的坐标值。

通过类似于第 2 章中相关图像处理处理方法，最终得到几何校正后的图像，其前后对比如图 3-7。



a) 几何校正前

b) 几何校正后

图 3-7 几何校正前后对比

Fig.3-7 The contrast of Geometric correction

3.6 本章小结

本章主要对曲面情况下多投影几何校正进行研究,通过分析曲面投影画面变形特性,提出与平面几何校正不同的特征点编码方法。与第2章所用基本原理相同,同样是求取相机与投影仪中的特征点的对应关系,但是曲面幕投影变形较大,所需特征点数目越多越好,受到图像处理中三维重构的启发,本章提出把格雷编码算法应用到曲面投影拼接中,并总结出二进制码和格雷码相互转化的基本公式,便于在程序编写时应用。通过实验我们验证了该方法在投影拼接几何校正中的可行性,但是方法需要进一步优化,像素识别的准确率问题还需要更进一步的深入研究。

第4章 亮度校正

4.1 引言

在多投影拼接显示系统中,完成几何校正这一关键步骤后,各台投影机将自己负责的图像进行投影输出,在投影幕上显示出一幅拼接完整的图像。在布置投影机时要求投影机投射区域有相当部分的重叠,以便于进行几何校正,这使得在重叠区域有两台投影机共同覆盖成像。由于进行了几何校正,显示的图像没有几何错位,画面重叠比较准确,但是在亮度方面,该区域接收了两台投影机输出的光线,出现了比较明显的亮带。因为人眼对亮度十分敏感,亮带的出现同样割裂了画面的完整性,极大的影响了拼接效果。因此,采用一种有效的方法使重叠区域的亮度下降,与周围区域过渡平缓,与整体图像亮度保持一致是十分必要的。

本章对多投影拼接的亮度校正进行相关研究,并使用有效的亮度均匀化方法即 Alpha 通道蒙版图像融合的方法,对重叠区域的亮度进行有效降低,较好解决的重叠区域亮度过高的问题。

4.2 Alpha 通道简介

对于使用 32 位存储的图像,红、绿、蓝三通道和 Alpha 通道分别使用 8 位表示。Alpha 通道是表述和衡量图像的一个重要指标,一幅图像的透明程度由其数值大小决定,一般用 256 级灰度来决定图像的透明度信息。Alpha 为 0 表示图像是纯透明的,Alpha 值为 255 时表示图像完全不透明,Alpha 值介于 0 到 255 表示部分透明。一个像素点的特性也用 4 个通道进行描述,即(R、G、B、 α),其中 R 表示红色通道;G 表示绿色通道;B 表示蓝色通道; α 表示 Alpha 通道^[57],如图 4-1 所示。Alpha 通道值乘以各通道的颜色值用来确定某一像素点在最终显示时各通道的透明程度。

Alpha 通道采用多级灰度级确定图像的像素在显示时的透明度,这一特性在图像的拼接融合中发挥了很大的作用。多投影拼接亮度校正中也将利用 Alpha 通道这一特性来实现重叠区域亮度衰减。由于在多投影过程中,重叠区由多台投影机共同显示,若不加处理,重叠部分光线进行叠加,必然亮度明显高于其他区域。采用 Alpha 融合处理,根据不同区域亮度特性,对每台投影机生成一幅蒙版图像,投影拼接显示时与各台投影机的图像融合输出,达到对重叠区域亮度准确的

降低，使整个屏幕上的图像看起来亮度一致，没有亮度不和谐的部分。所以本章的关键就是选取合适的 Alpha 融合函数，生成蒙版图像。

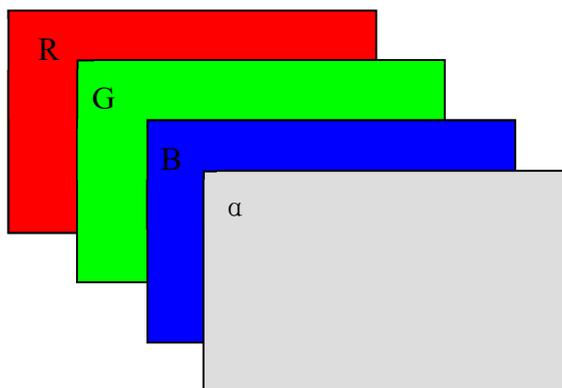


图 4-1 图像的四通道

Fig.4-1 The four channel of image

4.3 Alpha 蒙版图像

几何校正后投影仪的图像显示均已对齐，投影图像规则的显示在校正以后的区域内，拼接图像在几何形状上基本没有错位与扭曲。此时，影响视觉感官的主要是在重叠区域的亮度突变，破坏了画面的整体感。如图 4-2 所示。

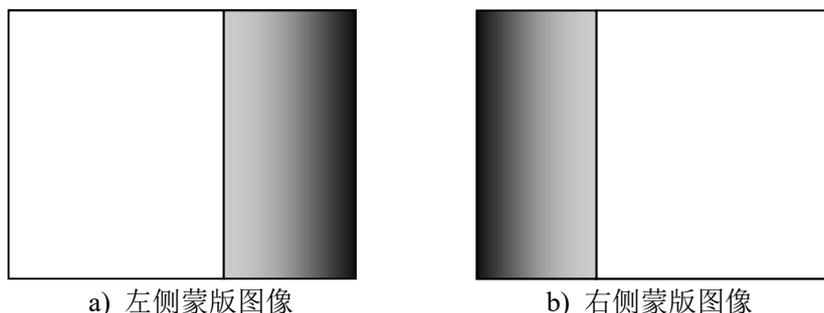


图 4-2 重叠区域亮度过高

Fig.4-2 High brightness of the overlapping area

图像的透明度对人的感官来说就是我们看到的屏幕上的图像的亮度。如果我们生成一幅蒙版图像，如图 4-3，在非重叠区域其 Alpha 通道值为 0 表示纯透明。在和重叠区域对应的部分像素设置合理的 Alpha 通道值，使生成的图像部分透

明，把这幅图像融合到将要显示的图像上，那么部分透明的区域将会降低所显示图像的透明度，使重叠区域感官亮度降低。



a) 左侧蒙版图像

b) 右侧蒙版图像

图 4-3 蒙版图像示意图

Fig.4-3 The mask image schematic

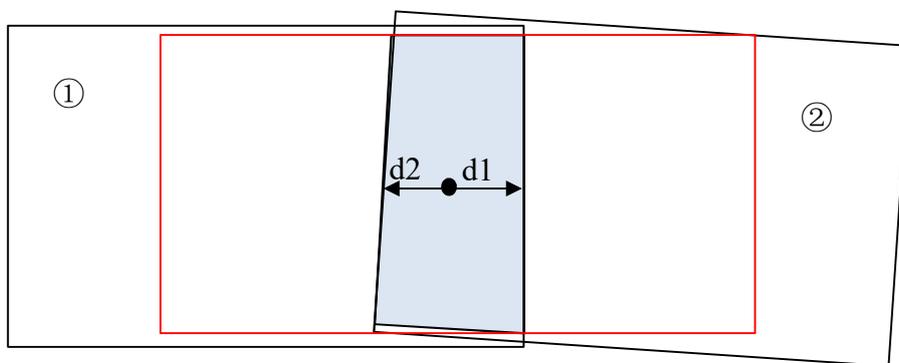


图 4-4 公共显示区域

Fig.4-4 The Overlapping display area

首先要根据 2.2.4 节投影有效区域的求取中所求取得两台投影机之间公共的有效显示区域，并明确该公共显示区域每台投影机如何负责显示，因为在公共显示区域即重叠区域需要设置蒙版图像的透明度，在不重叠区域直接把 Alpha 通道值设置为 0 即可。在没有进行实验时，我们直观地认为既然重叠区域由①与②两台投影机共同覆盖如图 4-4，那么该区域亮度就为两台投影机亮度值之和，即重叠区域亮度为非重叠区域亮度的 2 倍。那么降低重叠区域亮度的方法就是把重叠区域内投影机①与②的蒙版图像的 Alpha 值设为 0.5 即可，为了方便讨论与计算，对 0~255 级表示的 Alpha 值做归一化为 0~1^[58]。这样每台投影机在重叠区亮度分别降为原来的一半，理论上叠加之后的亮度为 1。通过具体实验发现，这种方法效果很差，该方法处理后重叠区域亮度下降太多反而产生一条生硬的“暗带”，如图 4-5，这说明简单的亮度减半不能满足亮度校正的需要，所以我们需要给蒙版图像重叠区域像素的 Alpha 值进行合理的赋值分配，使得重叠区域亮度得到准确的修正，过渡自然。



图 4-5 两台投影仪亮度各衰减一半显示效果

Fig.4-5 The result display of two projectors' half brightness

4.4 Alpha 融合函数

为了达到理想的亮度校正效果，在实际应用中我们不采用阶梯式的亮度下降，而是采用亮度连续缓慢下降的方法。每台投影仪在重叠区域的亮度从一个边界开始递减即 Alpha 值从 1 开始按一定规律递减为 0。我们用函数 $F(x)$ 来描述 Alpha 值的变化规律并称其为融合函数。融合函数的选择对蒙版图像的生成和最终的亮度校正结果起着至关重要的作用。选择合适的融合函数 $F(x)$ ，能使重叠区的亮度得到合理衰减、亮度校正达到更好的效果，若函数 $F(x)$ 选择不当，则重叠区域亮度衰减的不合理，最终影响画面显示的效果^[59]。

我们设定的函数 $F(x)$ 带有相关参数用来调节其坐标曲线，进而确定蒙版图像在重叠区域每一像素的透明度。参数的个数、权重和不同参数值均对 $F(x)$ 的函数形式和函数值有较大影响，图像亮度融合的效果将也不同。通过多次实验，对每种参数下融合函数的优缺点进行对比，最终确定最适当的参数。本章探索运用基于非线性函数的融合方法来实现重叠区域的亮度校正。对于重叠区域之内的像素，为了计算方便，我们用归一化方法对重叠区域尺寸大小进行处理，将两幅图像的重叠部分的像素坐标用 0 到 1 的数值表述，0 表示重叠区域的开始，1 表示重叠区域的结束。融合函数 $F(x)$ 如下：

$$F(x) = \begin{cases} a(2x)^p, & 0 \leq x \leq 0.5 \\ 1 - (1-a)(2(1-x))^p, & 0.5 \leq x \leq 1 \end{cases} \quad (4-1)$$

分析可知函数 $F(x)$ 曲线的曲率与参数 p 相关， $p=1$ 时函数图像直线， $F(x)$ 是

线性函数，从而透明度 Alpha 值的变化规律也是线性的，对应到图像显示上可能会导致在重叠区域的边缘上出现亮度跳跃。随着 p 值的增加，函数曲线在 0 和 1 附近曲线越来越平缓，表示蒙版图像透明度在重叠区域开始和结束的位置变化趋势比较缓慢，Alpha 如此变化能有效防止校正后重叠区域图像的亮度在此处产生阶跃。参数 a 和蒙版图像的亮度相关，当 $a \geq 0.5$ 时，Alpha 值偏大，重叠区域偏暗，当 $a \leq 0.5$ 时，Alpha 值偏小，重叠区域偏亮。 x 是上面归一化后像素在重叠区域的相对位置坐标值。在图 4-4 中，某一像素的 x 值为 $x = \frac{d1}{d1+d2}$ 或 $x = \frac{d2}{d1+d2}$ 。如果上下投影仪上下重合， $d1$ 和 $d2$ 则表示像素点到重叠区域上边界和下边界的距离。

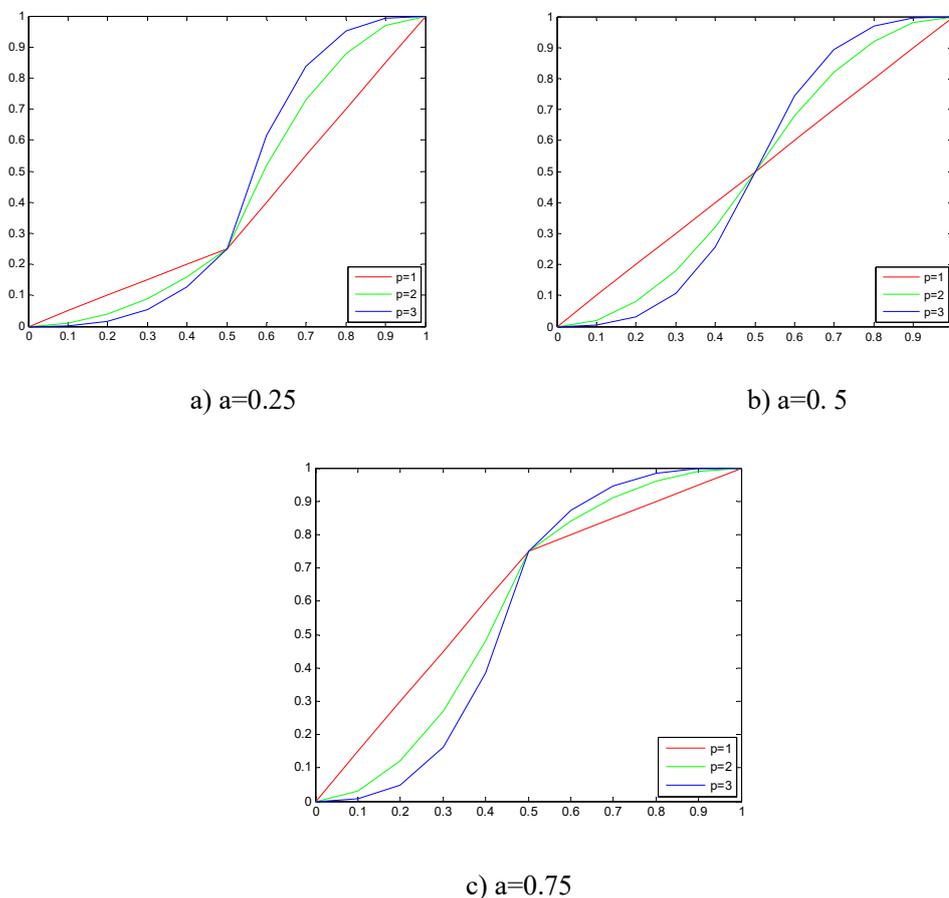


图 4-6 a 和 p 取不同参数时的函数曲线

Fig.4-6 Function curves for different values of p and a

图 4-6 为 a 和 p 取不同参数值时融合函数 $F(x)$ 的不同变化趋势。在实际应用时对融合 $F(x)$ 函数要保证在重叠区域的每个像素点通过多台投影重叠计算所得到的 $F(x)$ 具体值和为 1，例如对于图 4-4 中左侧投影仪其 $x = \frac{d1}{d1+d2}$ ，重叠区域融合系数值为 $F(x)$ ，则右边投影重叠区的融合系数为 $1-F(x)$ ；若右边投影重叠区

的融合系数为 $F(x)$ ，其 $x = \frac{d2}{d1+d2}$ ，那么左边投影重叠区的融合函数应为 $1-F(x)$ 。这样计算是为了确保重叠区域 Alpha 值为 1，重叠区域在最终显示时和非重叠区域亮度达到基本一致。

4.5 亮度校正实施

针对本实验中用到的投影仪，我们通过借鉴前人经验并进行自己的实验得到当图像边缘融函数的相关参数 a 取 0.5 左右， p 取 2 左右时亮度校正效果较佳。最终我们选择 $F(x)$ 的公式如下：

$$F(x) = \begin{cases} 2x^2, & 0 \leq x \leq 0.5 \\ 1 - 2(1-x)^2, & 0.5 \leq x \leq 1 \end{cases} \quad (4-2)$$

该函数具体对应图 4-5b) 中的绿色曲线，该融合函数曲线在重叠区边缘 $x=0$ 和 $x=1$ 处的斜率比较小，曲线变化走势比较平缓，该特点对蒙版图像中处在重叠边缘处的像素的透明度计算误差有很好的容错度，在计算时不至于出现较大幅度变化误差；同时和其他函数曲线相比，该函数的曲线在重叠区域中间 $x=0.5$ 附近的斜率不至于太大，可以实现亮度的平滑过渡。根据该融合函数生成的蒙版图像如图 4-7。

最后，将蒙版图像与将要显示的画面图像一起进行纹理贴图，融合显示，这样就实现了多投影重叠区域亮度校正。各台投影仪输出效果如图 4-8 的 a) 和 b)，最终显示效果如图 4-8c)。

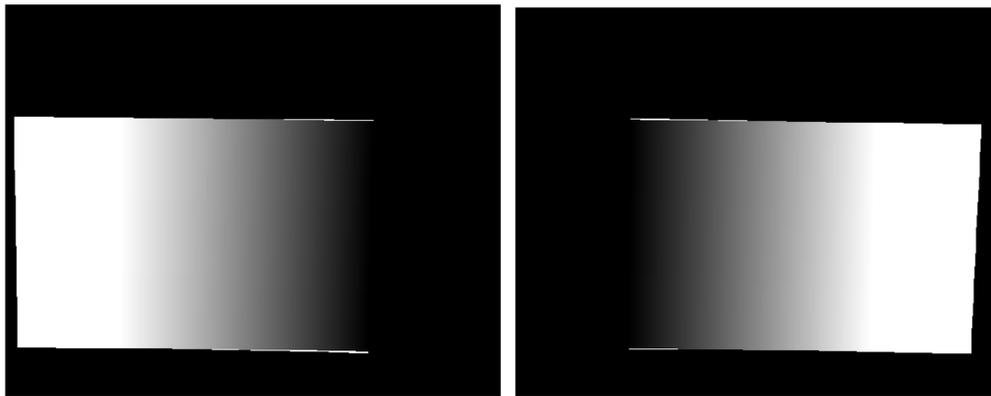


图 4-7 实验中的蒙版图像

Fig.4-7 Mask image in our experiment

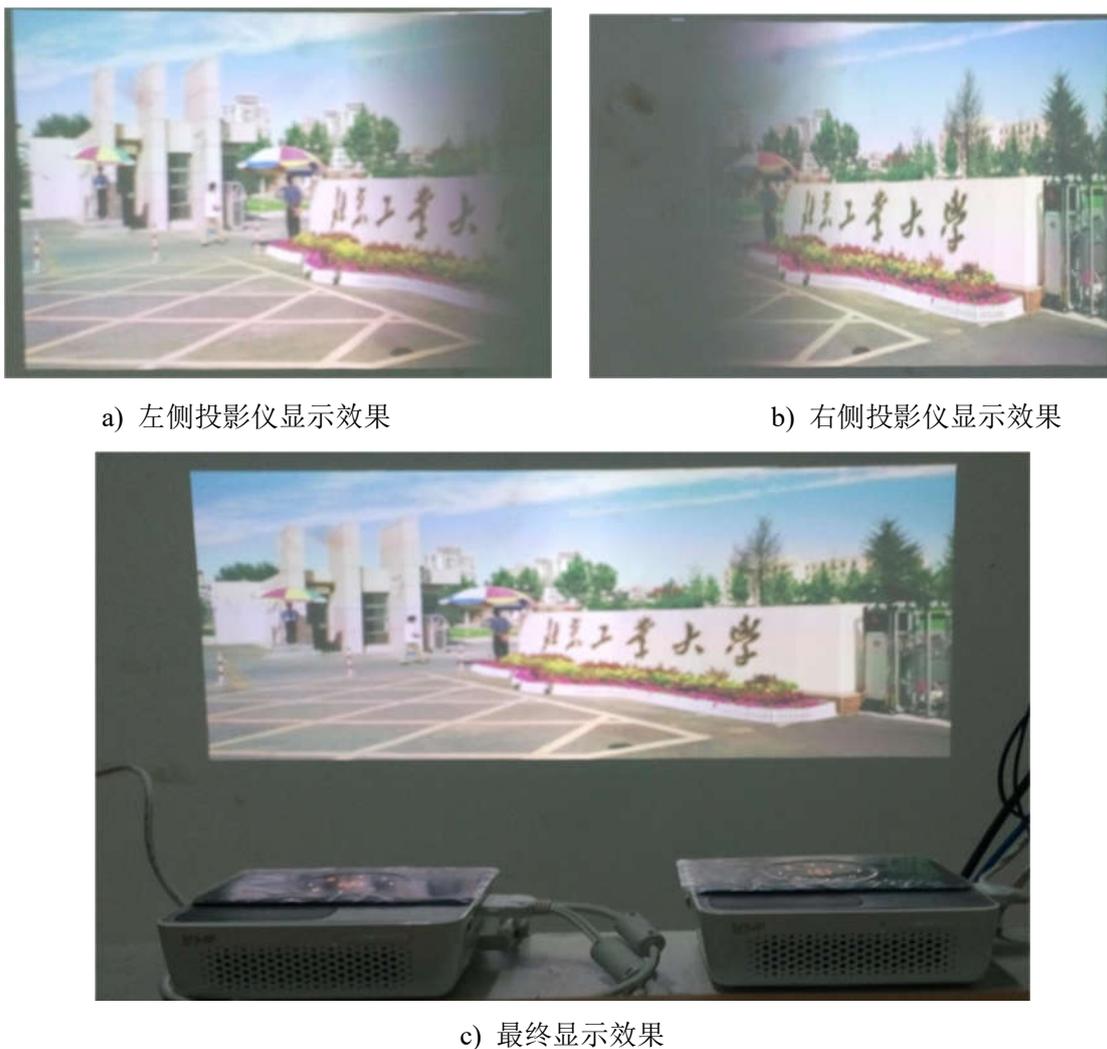


图 4-8 亮度校正实验结果

Fig.4-8 Brightness correction results

4.6 本章小结

本章主要对多投影拼接的亮度校正进行研究,基本思路是采用 Alpha 蒙版图像的方法对各台投影机将要输出的图像进行亮度衰减。通过几何校正部分我们知道了重叠区域范围,然后通过实验分析对比,本章选取了合理的融合函数对重叠部分进行亮度衰减,生成了蒙版图像,在最终输出时,把蒙版图像与将要显示的图像进行融合输出,达到亮度校正。通过实验显示来看,该方法合理可行,能达到对重叠区域亮度的有效衰减,整个图像亮度过渡自然。

第 5 章 投影拼接系统硬件集成

5.1 引言

本文在第 2 至 4 章详细地论述了多投影拼接系统中几何校正和亮度校正的原理方法,完成了使用摄像机反馈的多投影拼接系统关键技术中几何校正和亮度校正部分。在整个系统构建过程中,各个硬件部分的性能对最终显示效果也有较大的影响,在本章中将对投影拼接系统的硬件具体构建问题进行论述,包括投影仪、主机、相机的选择等。在课题开展同时我们对投影仪进行了充分调研,在这里将对投影仪的性能类型与评价指标展开论述并给出投影拼接系统投影仪选择的建议。

5.2 系统组成

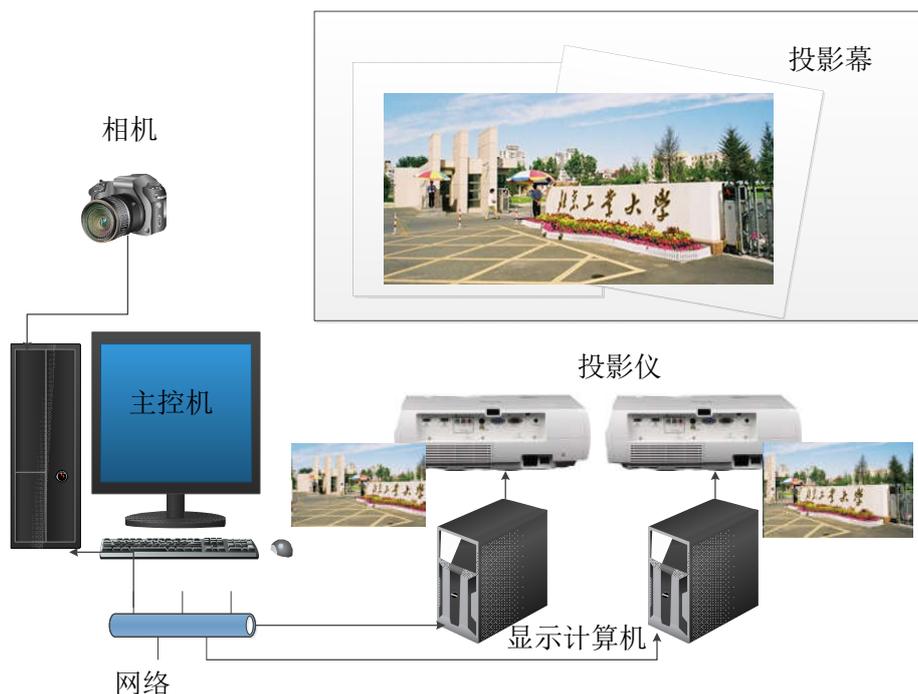


图 5-1 实验中构建的投影拼接系统

Fig.5-1 Multi-projection system in our experiment

在实际实验中我们构建的投影拼接系统如图 5-1。我们构建了一套通过高速局域网连接的图形计算机集群系统。该系统由一台主控机、两台分支显示计算机组成 Client/Server 结构,加上相机、投影仪和相关外设组成。在主控机和显示主机内运行相关系统软件,形成一套完整的投影拼接校正系统。主控计算机连接相

机或摄像头负责图像采集和相关计算，并把相关校正数据发送给显示计算机。每台显示计算机负责调用与其相关的校正信息对将要显示的图像进行处理，并传输到相连的投影仪中，投影仪负责把图像投影到屏幕上。后面我们将对系统的硬件平台和软件代码实现进行介绍。

5.3 投影仪调研综述

作为投影显示系统的核心组成部分，投影仪的选择对最终显示效果的评价有较大的影响，投影仪的分辨率、亮度、色彩等指标将是影响最终画面的关键因素。课题开展中我们对目前市场上的投影仪进行了详细的调研。下面对市场出现过的几类主要投影仪进行分类介绍，并分析其优缺点。同时总结了投影仪和画面显示质量相关的主要评价指标，并对投影仪的选择给出相关指导意见。

5.3.1 投影仪种类

CRT 投影仪。CRT 投影仪的成像器件是阴极射线管 (Cathode Ray Tube)，工作原理和早期电视机相似，它是应用最早的投影仪显示方式。该投影仪内部有红、绿、蓝三个 CRT 荧光屏，输入信号被分解后分别输送到这三个荧光屏，然后信号被放大、汇聚、投射在屏幕上。这种投影仪还有一个名字叫做三枪投影仪。CRT 投影仪采用内光源，属于主动式投影方式。CRT 投影仪的优点是图像色彩较为丰富、分辨率高、对比度好，几何失真自我调整能力强；缺点是价格贵、亮度较低、操作复杂、体积庞大不易搬动和安装、对安装环境要求高。

LCD 投影仪。LCD(Liquid Crystal Display)进行显示的原理是液晶的光电效应。液晶的光电效应，即液晶分子的排列在电场作用下发生变化，影响其液晶单元的透光率或反射率，从而影响其化学性质，产生具有不同灰度层次及颜色的灰度图像。

LCD 投影仪根据成像器件不同又可以分为两种形式，液晶光阀投影仪和液晶板投影仪。简单来说 CRT 投影仪加上液晶和光阀组成了液晶光阀投影仪基本结构。它采用了外置光源，对投影仪的分辨率和亮度特性进行了优化。这种方式称为被动投影。该投影仪由于采用外置光源画面亮度较高，因而可以适用于外界光线较强、投影范围较大的场合，比如大规模的会场、大型展示中心等。但这种投影仪价格不菲，体积较大，光阀损坏后维修困难。这类投影仪现已逐步淘汰。液晶板投影仪以液晶板作为成像器件，被动投影方式外光源采用金属卤素灯或冷光源(UHP)。投影仪上的液晶板采用活性液晶体制成，因为只有活性液晶体才具

有良好的透光性。按照组成投影仪的液晶片数目不同，LCD 投影仪又可分为单片 LCD 投影仪和三片 LCD 投影仪。目前市场主流液晶板 LCD 投影仪均为三片 LCD 投影仪。三片 LCD 投影仪对光的利用率高，投影效果比较好，色彩保真度高。缺点是对比度表现不是很高。

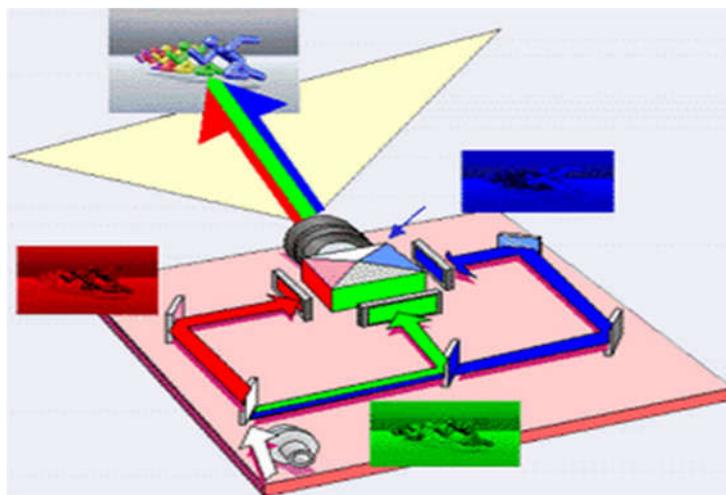


图 5-2 LCD 投影仪成像原理示意图

Fig.5-2 LCD projector Imaging principle schematic

DLP 投影仪。DLP(Digital Light Processing, 数字光处理技术)是目前比较流行的投影技术,该技术是一种全数字的反射式投影技术,投影图像经过数字处理然后进行投影显示。DLP 投影仪的核心成像器件是数字微镜装置 (Digital Micro-mirror Device, DMD),数字微镜装置对传输到投影仪中的信号进行调制,然后驱动 DMD 光学系统,最终图像信号通过透镜进行投影显示^[60-61]。DLP 投影仪原理图如图 5-3 所示。DLP 投影技术实现了图像信息的数字化处理与显示。DLP 投影仪与其他投影仪的不同之处就是用数字微镜装置代替了其他投影仪中的成像器件。反射式数字微镜的使用,使得投影仪内部成像部分的对光源利用率大大提升,这种特性就可以使 DLP 投影仪即使在环境光线较多的情况下也能有较好的投影显示效果。因而更高的亮度和对比度是 DLP 投影仪的主要特点之一。DLP 投影仪的特点如下:

(1)画面均匀、噪声消除。由于 DLP 投影仪采用的是数字技术,可以直接捕获数字信号,投影仪的输入信号不需要经过 A/D 转换就能直接调制生成图像,因此信号的中间环节减少之后,投影信号的衰减幅度就会很自然地减小很多,这样的投影仪将产生很小甚至消除噪声。

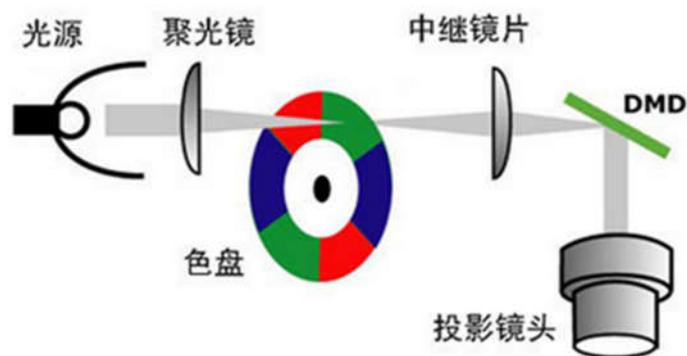


图 5-3 DLP 投影仪原理图

Fig.5-3 DLP projector imaging principle schematic

(2)投影画面明亮。传统的投影仪在外界光线较强时，投影出来的画面效果就会变得非常模糊。现在越来越多的公共场合都有使用投影仪的需求，在不同场合工作的投影仪无论白天黑夜都应该投射出明亮的画面。在 DLP 投影仪内部有几十万个微小镜片，这些镜片都能做到把接收到的光线的 90%进行反射出去，成为投影幕上图像的亮度来源。DLP 投影仪还有一个重要特性是 DLP 投影技术使得输出图像的亮度与输入图像的分辨率成正比关系，这样投影仪的画面明亮效果不仅仅与外部光线有关还与内部器件有关系。这种优点可以使投影仪有效应对各种外界光线环境，保持较佳的投影图像亮度效果。

(3)性能稳定可靠。DMD 是 DLP 投影仪的核心部件，因此该装置的性能稳定性决定了投影仪整体性能的可靠稳定。通过各种严苛条件检测显示，DMD 内部所有材质均表现出了较强的稳定性。在对 DMD 部件进行疲劳测试时，DMD 芯片可以做到连续进行 1G 次的测试循环而不出现问题。1G 次的循环实验对应到平时的使用频次相当于该投影仪至少可以使用 20 年。

(4)体积小、重量轻。由于 DLP 投影仪摒弃了传统投影仪中复杂、笨重的光学成像器件，取而代之的是宽度只有 16 μm 的 DMD 芯片，整个 DMD 光学成像器件无论是在体积上还是在重量上都不会很大。

LCOS 投影仪。LCOS(Liquid Crystal on Silicon)又称硅基液晶，LCOS 投影技术是一种结合半导体工艺和 LCD 的新兴技术，该技术最早出现在 20 世纪 90 年代末期。采用 LCOS 投影技术的投影仪的具有较多优点：反射式成像、高分辨率、光利用率高、色彩鲜艳、灰度优秀、体积小，在许多方面的性能都超过了 DLP 和 LCD 投影仪。

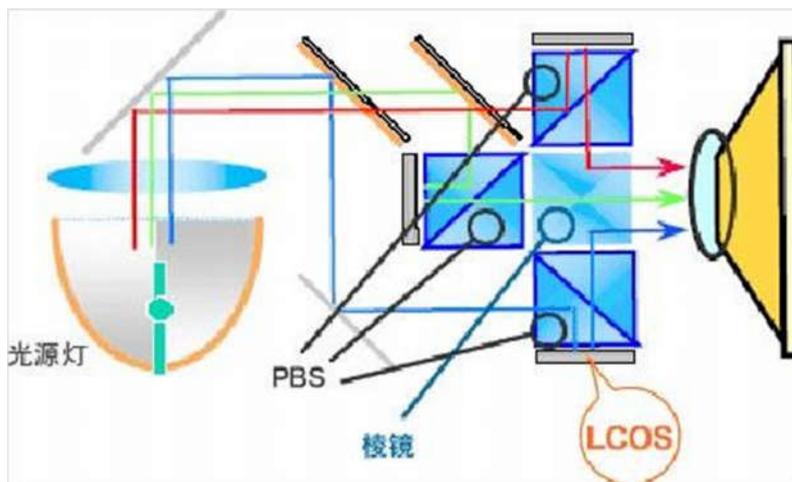


图 5-4 LCOS 投影机原理图

Fig.5-4 DLP projector imaging principle schematic

LCOS 投影机原理如图 5-4 所示。虽然 LCOS 投影机性能较佳，但是目前 LCOS 发展还存在一定问题：一是行业标准不统一，二是 LCOS 制造工艺还存在瓶颈，良品率受到制约，成本相对较高。因此 LCOS 投影机还是难以与 LCD 投影机或 DLP 投影机相抗衡，目前还没有进入目前主流消费市场。

5.3.2 投影机的几个重要指标

(1)分辨率。投影机分辨率表示方法是投影机所能投射画面的水平像素数乘以垂直像素数。投影机的分辨率一般不是指投影机可以接收的信号分辨率，而是指它们的核心光引擎（DMD 芯片、LCD 面板、LCOS 面板等）的物理分辨率。物理分辨率也称标准分辨率，物理分辨率为 1024×768 的投影机并不表示投影机只能支持 1024×768 分辨率的图像，可以接收的分辨率有一定的范围，一般一个投影机会有一个最高分辨率的指标，它表示投影机所能够显示的最高分辨率。需要注意的是，高于物理分辨率的图像即使能够显示，也是通过了差值，导致画面细节出现损失，使其清晰度略低于物理分辨率的图像。常见分辨率有：经济型投影机的 800×600 ；主流商务和教育投影机的 1024×768 ；中高档投影机的 1280×720 和 1920×1080 等。

(2)亮度。投影机亮度来源于机身内灯泡，本质上也就是灯泡（组）的亮度。目前投影机灯泡的单个亮度可以做到 3000 流明以上，高亮度的投影机一般是双灯，甚至 4 灯，开启多个灯泡时投影机功率也会相应增加。如果亮度不够，投影受环境光影响就大，观众也容易疲劳，在立体投影中也会降低观众的沉浸感。屏

幕的尺寸和增益亦会影响人的亮度感觉，因此，投影仪的亮度指标需要配合环境和屏幕来选择。

(3)对比度。投影仪的对比度也是影响画面显示质量的一个重要指标。在某些情况下其重要性堪比亮度。对比度是画面最亮(可以理解为纯白)和画面最暗(可以理解为纯黑)的亮度比值。也就是，画面由黑变到白需要经过多少个渐变层次。从视觉感受上讲，比值越大，从黑到白的亮度对比越强烈、灰度渐变层次越丰富，能够获得更锐利、更细腻的主观视觉感受，显示彩色图片时，能够获得鲜明艳丽的效果。对比度太小的画面会给人一种灰蒙蒙的感觉。

(4)投射比。投射比=投影距离/画面宽度。从公式可以看出，相同的投影距离，比值越小，获得的画面宽的越大。普通投影仪的投射比，通常在 1.5-1.9 之间。如果投影仪摆放位置和投影幕之间的空间有限，首先需要考虑投影仪的投射比。因为投影距离太小就会导致显示画面不够大，那么就需要选择投射比较小的投影仪。

5.3.3 投影仪的选择

目前，工程上采用的投影仪一般根据用户的现场情况、需求、资金情况以及产品渠道综合而定。CRT 投影仪已经逐步淘汰，目前 LCD、DLP 投影仪占据主流投影仪的绝大部分市场，DLP 投影仪的品牌型号又多于 LCD 投影仪。LCOS 投影仪目前产品款数不多，价格普遍较高。在多投影拼接中，由于整个画面为多台投影仪拼接而成，投影仪的色彩越是接近，拼接效果越好。从投影仪的发光方式来看，LCD 投影仪采用光线折射成像方式，具有两个问题：一是 LCD 板本身就存在出厂色差问题；二是 LCD 板随着使用时间增加会逐渐老化。第一个问题带来的困难是在拼接或融合等对色彩一致性要求较高的场合时，虽然可以通过多台机器寻找色差接近的产品或在后期进行校正，但是这种后期处理倒不如选取不产生问题的 DLP 投影仪。第二个问题带来的困难是由于 LCD 板老化速度不一致，会在后期引起图像不同区域色彩偏差，局部偏色问题较为严重，严重影响了大屏幕拼接的效果，增加了后期维护的成本。所以我们建议在多投影拼接显示系统硬件器材选型时要尽量避免使用 LCD 投影仪。

基于我们的实验环境特点，我们选择了明基 GP3 型 DLP 投影仪。综合上述分析，DLP 投影仪综合性能较佳，能适用于较复杂的实验环境。该型号投影仪体积小、质量轻，便于在实验时经常的位置改变和固定，并能适应较小的位置空间。该投影仪亮度为 300 流明，对比度达到 10000: 1，分辨率为 1280*800，投

射比为 1.16，并支持 HDMI、VGA、Video 等多种视频格式输入。相关指标均能满足实验要求。

5.3.4 主机、相机等设备选择

对于分支显示计算机一般要求配置相同，相同的计算机可以保证程序运行、图像输出等运行过程的实时一致。这样可以避免不同投影仪在输出自己画面时的不同步，增加系统的稳定性。对于主机的配置，选择目前市场上主流的计算机即可。建议 4G 及以上内存、独立显卡支持数字视频（DP、DVI、HDMI）输出格式。对于视频显示系统来说，显卡配置应高一些，这样可以保持图像处理的高效性和画面显示的美观。在本课题搭建的系统中我们选择了戴尔 T1700 主机，该型号配有 8G 内存，2G 的 Nvidia Quadro K620 型号专业显卡。

表 5-1 多投影系统硬件

Table 5-1 Hardware model in our multi-projection splicing system

名称	型号	品牌	图示
投影仪	GP3	明基 (BenQ)	
主机	T1700	戴尔 (Dell)	
显卡	Quadro K620	英伟达 (NVIDIA)	
USB 摄像头	355WW	奥尼 (Anoi)	
数码相机	60D	佳能 (Canon)	
路由器	TL-WR880N	TP-LINK	

对于相机，平面投影拼接可以使用 USB 摄像头，曲面投影拼接可以使用专业的数码相机。要根据不同试验环境，调节好相机的各项参数如：光圈、快门等。

对于网络环境，所有计算机需连接在同一局域网中，网线采用超五类网线。通过设置给各台计算机分配固定的 IP 地址，因为各台计算机之间是通过 IP 地址进行通信，这样设置可以确保在各台计算机的 IP 地址不会经常改变，便于拼接校正的实施和以后系统的使用。我们构建投影拼接系统所用到的主要硬件设备如表 5-1。

5.4 本章小结

本章主要对构建投影拼接系统的硬件部分进行了介绍。首先对投影仪的调研结果进行了具体论述。市场上出现的投影仪主要有 CRT 投影仪、LCD 投影仪、DLP 投影仪、LCOS 投影仪四种。市场主流的是 LCD 投影仪和 DLP 投影仪。在评价投影仪性能方面，介绍了投影仪的主要性能指标。通过对比分析，结合我们所处具体实验环境，最终选择了明基 GP3 投影仪作为系统实验投影仪。同时给出了满足实验要求的主机、显卡、相机等其他硬件选型与配置。最终构建出符合实验要求的多投影拼接实验硬件系统。

第6章 投影拼接软件系统设计

6.1 引言

投影拼接系统由硬件环境和软件系统共同组成。软件系统是投影拼接系统的大脑，它负责信息采集、计算处理、数据传输等多项重要功能。在明确了相关算法原理之后，对软件系统正确合理的规划和设计关系到多投影拼接的实用性和最终显示的准确性；也会关系到软件设计人员在设计过程中的修改、优化和以后软件版本的升级。

在本章我们依据软件编写相关原则，进行多投影拼接显示系统的实验型软件系统代码的编写。首先对系统进行了合理的模块划分，明确每部分具体功能，然后对每个模块的代码实现进行了简要的论述。最终完成软件系统的构建。

6.2 软件系统设计原则

软件系统设计是多投影拼接系统构建中的另一个重要环节，在给各步骤设计好正确的算法和实施步骤后就需要用代码编写程序把所需要的功能实现出来。同时整个投影拼接软件的实现是一个系统问题，需要进行合理进行规划设计，使软件系统能够健康平稳运行^[62]。

软件系统设计需要遵循一定的原则，在这里进行简要论述：

(1)模块化。模块化是指把将要开发的软件系统进行功能分解，每个功能的实现对应一个独立的模块，这样就可以分别对每个模块进行开发测试，最终再进行组合。模块化可以使程序的结构更为清晰。

(2)信息隐藏。信息隐藏即把和模块相关的程序信息尽量隐藏在本模块内部。有效的信息隐藏对程序编写带来较大便利，在程序修改时，某一元素需要修改，那么只需要在一个模块内部进行修改，而不需对其他模块改动。

(3)模块独立。模块独立是优秀设计的关键。模块独立顾名思义就是一个模块单独完成一个特定功能，并且与其他模块的联系尽可能最少。但是模块独立并不意味着每个模块部分的绝对独立，一个功能丰富的程序系统需要各部分之间进行有效的信息传递。在这里要做的是使信息传递高效无冗余。模块的独立对程序编写时各模块的测试和维护十分方便。

6.3 系统总体分析

投影校正系统流程图：

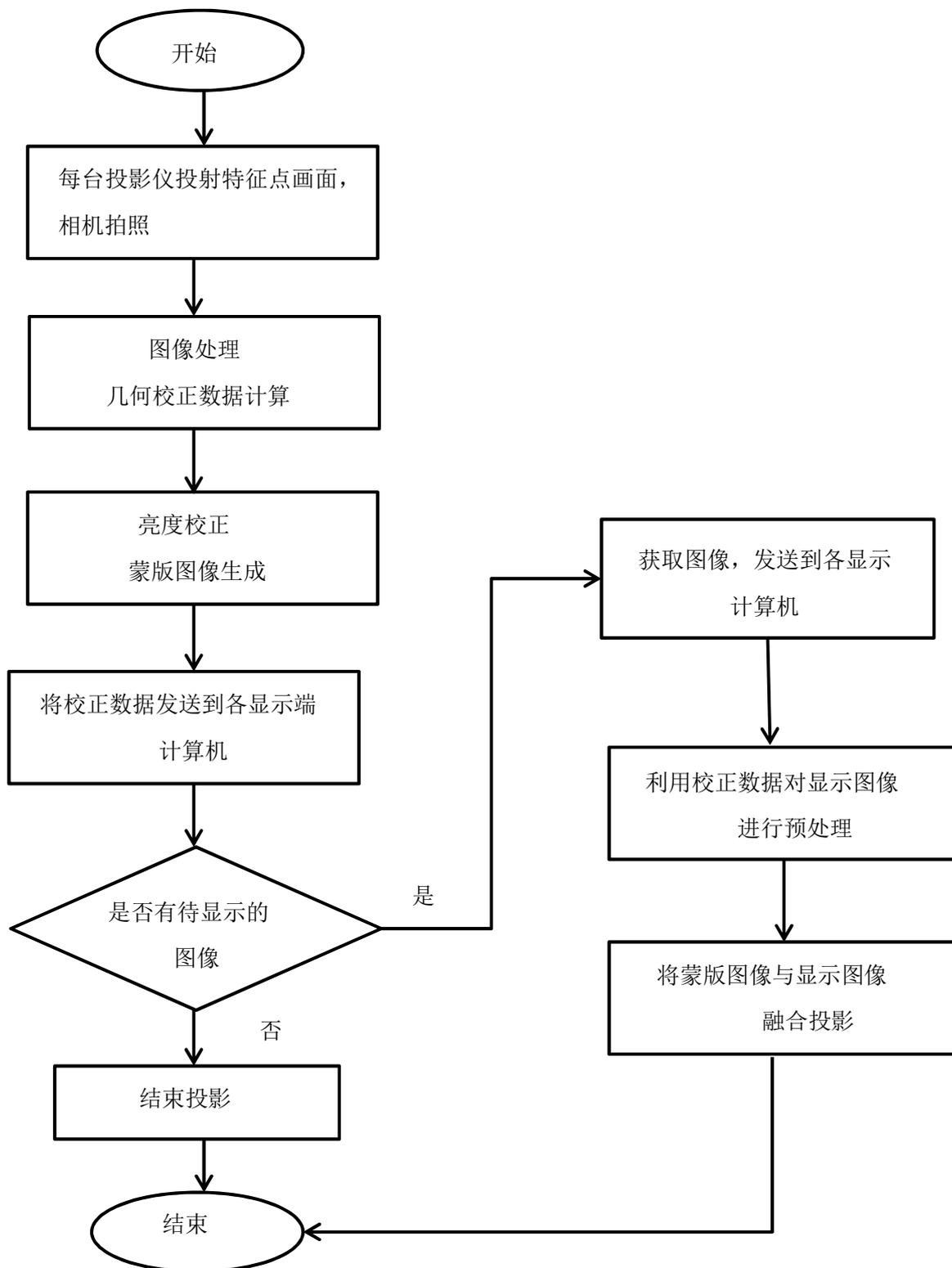


图 6-1 投影校正系统流程图

Fig.6-1 Flow chart of multi-projection correction system

通过上面的论述，我们在程序设计时要着重理清程序思路，合理的对程序的功能步骤进行规划，正确对程序进行模块划分，使各个模块间最大程度的保持独立。这样可以为程序下一步的修改、优化进而推出功能更加完善的多投影拼接系统打下基础。

要对模块进行合理的划分，首先需要对程序的功能和实现流程进行详细的分析与理解，找出可以划分在同一模块的变量和函数，最大限度地达到模块独立、信息隐藏的准则。

首先按图 5-1 样式配置好投影拼接系统，把各台计算机连接在同一局域网中。由于我们使用的是 Client/Server 结构，在主控端和客户机端需要分别编译运行不同的程序并进行不同的配置。在可控计算机端，把相机与主机相连，通过调节使各投影仪画面在相机视野内并使画面清晰。把投影仪数目、分辨率、与之相连的每台显示计算机的 IP 地址传送给主机的程序。运行主控端程序依次控制每台显示计算机显示特征点图像并拍照，所有显示计算机特征点采集完毕后，主机则进行相关图像处理并进行几何校正、亮度校正的处理和计算，生成相关数据或图像并发送给各台显示计算机。然后各台显示计算机的程序调用各自的校正文件和将要显示的图像进行显示，最终在屏幕上显示出一幅各台计算机共同投影拼接显示的图像，完成投影拼接校正过程。把校正和图像输出独立编写程序，形成独立的模块，如果投影仪和相机的位置未发生改变，那么显示程序修改或再次调用时，就不必再次运行校正相关程序，直接调用显示程序进行显示即可。在校正部分还可以对几何校正和亮度校正再次进行模块划分。

6.4 系统模块划分

理解了程序的详细功能和运行流程后，我们对主控机和显示计算机端进行模块划分。

主控计算机模块：

- (1)配置信息读取模块：读取投影仪数目、分辨率等配置信息；
- (2)摄像头驱动拍照模块：驱动摄像头拍照并进行处理；
- (3)几何校正模块：实施几何校正，生成校正文件；
- (4)亮度校正模块：实施亮度校正，生成蒙版图像；
- (5)通信模块：负责和显示计算机通信、传递文件。

显示计算机模块：

- (1)特征点图像显示模块：编辑特征点图像并显示；

(2)通信模块：与主机进行通讯、传递文件；

(3)图像显示模块：读取校正拼接信息文件，处理将要显示的图像，然后显示。

6.5 主要模块实现

6.5.1 配置信息读取模块

在进行实验时，首先要把系统所需的配置信息如投影仪数目、投影仪分辨率、显示计算机的 IP 地址等写入配置文件，那么就需要设计相关函数代码读取这些信息。C 语言中提供了相关函数可以帮助我们完成这一工作。其中 `fopen()` 函数可以实现配置文件的打开；`fgets()` 函数可以实现从指定的文件中读一行字符到调用者提供的缓冲区中；`fclose()` 函数可以实现关闭所打开的文件，并释放文件指针和有关的缓冲区。

`fopen()` 函数。

函数原型：`FILE * fopen(const char * path, const char * mode)`。

参数说明：

`path`—包含了路径的文件名。

`mode`—指定文件以何种方式打开。打开方式有：“r”表示只允许对存在的文件进行读操作；“r+”表对存在的文件可以进行读写操作。

`fgets()` 函数用于从文件读取指定数目的字符。

函数原型：`char * fgets(char * string, int size, FILE * stream)`。

参数说明：

`string`—一个字符串，函数读取的字符保存至 `string`。

`size`—要读取的字符的个数。每次最多读取 `size-1` 个字符。如果字符数不足，则补充 '\0'；如果字符数过多则读取到 `size-1` 个。

`stream`—文件指针。

`fclose()` 函数。

函数原型：`int fclose(FILE *fp)`。

参数说明：`stream`—文件流指针。

`fopen()`、`fgets()`、`fclose()` 均是 C 语言提供的标准输入输出函数，在编程时要包含标准输入输出头文件“`stdio.h`”。配置信息读取模块部分函数代码实现如下：

.....

```

char line[255];
char temp[255];
FILE *fp;//定义文件指针
fp = fopen(fileName, "r");//以只读方式打开文件
fgets(line, 254, fp);//读取文件信息
ProjNum = atoi(line);//获得投影仪数目信息
fclose(fp);//关闭文件释放内存

```

6.5.2 摄像头驱动拍照模块

本模块主要负责主机驱动相机拍照、存储。首先采用 OpenCV 中相关函数编写一个 Camera 类，在 Camera 类根据功能具体定义相关函数 StartCamera()、GrabFrame()、StopCamera()、SaveImage()实现打开相机、拍照、关闭相机、存储等具体功能。

在上面自定义的函数中主要调用 OpenCV 中函数实现相关功能，OpenCV 中 cvCreateCameraCapture 函数用来初始化并获取视频；cvGrabFrame()函数的功能是从当前的摄像头或者视频文件中抓取帧；cvRetrieveFrame()函数用来取回由函数 cvGrabFrame()抓取的图像；cvSaveImage()函数用来保存当前图像到指定文件并以指定的名字命名。

cvCreateCameraCapture()函数：

函数原型：CvCapture* cvCreateCameraCapture(int index);

参数说明：index—要使用的摄像头索引。

cvGrabFrame()函数：

函数原型：int cvGrabFrame(CvCapture* capture);

参数说明：capture 视频获取结构指针。

cvRetrieveFrame()函数：

函数原型：IplImage* cvRetrieveFrame(CvCapture* capture);

参数说明：capture—视频文件名。

cvSaveImage()函数：

函数原型：int cvSaveImage(const char* filename, const CvArr* image);

参数说明：

filename—文件名，如果存在同名文件则将其覆盖；

image—要保存的图像。

Camera 类部分定义如下:

```
class Camera
{public:
    int StartCamera();//函数预定义
    int StopCamera();
    IplImage* GrabFrame();
    void SaveImage(char * fileName, IplImage * image);
    .....};
```

StartCamera()函数部分代码如下:

```
int Camera::StartCamera()
{
    IplImage * image, *image1, *image2;
    camCap = cvCreateCameraCapture(0);
    if (!cvGrabFrame(camCap))
        return -1;
    image1 = cvRetrieveFrame(camCap);
    .....
}
```

GrabFrame()部分代码如下:

```
IplImage* Camera::GrabFrame()
{IplImage * image, *image1, *image2;
image1 = cvRetrieveFrame(camCap);
if ( !bufferInitialFlag)
InitialImageBuffer(image);
cvCopy(image, buffer[i]);
    }
.....
}
```

StopCamera()函数部分代码如下:

```
int Camera::StopCamera()
{cvReleaseCapture(&camCap);
}
```

SaveImage()函数部分代码如下:

```

void Camera::SaveImage(char * fileName, IplImage * image)
{if ( fileName == NULL)
    cvSaveImage("test.bmp", image);
    else
    cvSaveImage(fileName, image);
}
}

```

6.5.3 特征点图像显示模块

主要函数为特征点显示函数：我们编写了 void ShowPointImage(int bitnum) 函数来进行特征点的规律显示。在绘制圆形特征点时该函数中主要调用 OpenGL 的函数 gluDisk()来进行特征点的绘制。函数定义为:void gluDisk(GLUquadricObj* obj, GLdouble inner, GLdouble outer, GLint slices, GLint rings)。该函数是一个圆环绘制函数，可以对相关参数值进行设置用来绘制圆点。

6.5.4 几何校正模块

几何校正模块是整个软件的核心部分，因为几何校正过程中产生的校正数据将是整个校正系统实现的数据基础。该模块主要负责实现特征点的识别提取、特征点对应关系求取、几何校正文件生成等功能。对应相关功能，在这里我们简要论述第 2 章所提到算法的编程。具体如下：

int FindPoint (int projectorID) ——寻找每幅特征点图像的特征点；

void PointMapping(int bitnum, int pronom) ——特征点对应关系求取；

void Output()——输出校正文件。

函数的具体实现部分代码比较多，不便于局部展示，这里不再书写。

6.5.5 亮度校正模块

主要函数为蒙版图像生成函数：void MakeAlpha()。主要功能是根据第 4 章亮度校正部分所选取的 Alpha 融合函数，生成蒙版图像。

6.5.6 通信模块

通信模块是利用 Winsock 来实现，主机和显示计算机主要通信的信息有：

(1)主机按顺序选择需要通信的计算机，显示计算机进行响应；

- (2)主机发送给显示端计算机特征点信息：数目、排列方式、大小；
- (3)主机控制客户端计算按编码规律显示特征点；
- (4)主机控制显示计算机全屏显示；
- (5)程序结束。

在主机端，我们编写了 `void SendPointInform(RenderServer s, int numinx, int numiny, int radius)`等函数来对应发送指令。在显示端用 `void ParseCmd(char * buf)`函数来监听主机发送来的指令。

6.5.7 图像显示模块

在图像显示模块，主要运用 OpenGL 的纹理贴图功能，已识别出的相邻特征点组成的三角形为基本校正单元进行纹理贴图。在亮度校正时我们设计了 Alpha 蒙版图像的方法来衰减重叠区域亮度，进而对每台投影仪都对应生成了一幅 Alpha 蒙版图像，要求 Alpha 蒙版图像和所显示的图像要同时输出，所以在绘制每台投影仪的输出图像后紧跟着绘制其蒙版图像，然后刷新输出。部分代码如下：

```
// 绘制图像
glEnable(GL_TEXTURE_2D);
glBindTexture(GL_TEXTURE_2D, texName[0]);
glBegin(GL_TRIANGLES);
for(i=0;i<(num_Feature_Y - 1);i++)
    for(j=0;j<(num_Feature_X - 1);j++)
    {
        glTexCoord2f();
        glVertex2f();
    }
glEnd();
// 绘制蒙版图像
glEnable(GL_BLEND);
glBegin(GL_TRIANGLES);
for(i=0;i<(num_Feature_Y - 1);i++)
    for(j=0;j<(num_Feature_X - 1);j++)
    {
        glTexCoord2f();
        glVertex2f();
    }
.....
glFlush();//刷新缓存，输出
```

6.6 软件工具与软件环境

软件工具与软件环境的选择是软件编写前的一个重要步骤，它关系到软件中相关功能的实现途径，基本函数库的调用方法，也关系到最终软件的应用环境。比如：软件是针对 Windows 还是 Linux 平台；采用何种编程环境和编程语言；调用哪些函数库来实现所需功能等，都是我们需要考虑的重要问题。在本文中，我们采用了微软公司的 Visual Studio 中的 Visual C++ 进行软件开发。Visual Studio 是微软公司为开发人员提供的集成开发环境，包含了 Visual C++、Visual C#、Visual Basic 等多种语言工具。Visual C++ 是用于 C/C++ 语言程序开发的工具，Visual C++ 功能十分强大、代码编写方便高效。所以我们在多投影拼接系统研究初级阶段首先以 Visual C++ 为工具开发面向 Windows 系统的投影拼接软件系统。

6.7 本章小结

在本章中主要论述投影拼接软件实现相关内容。首先论述了软件系统的设计原则，这对软件的编写有前瞻性的指导作用，主动遵循软件编写相关原则会对软件编写过程中的修改和软件的优化升级带来较大便利。我们根据相关原则与前面几章论述的几何校正与亮度校正的算法原理，以 C++ 为编程语言，实现了 Windows 系统下的投影拼接实验系统。

代码编写部分是整个研究课题的重要部分，也具有较大的工作量。目前我们所编写的是一个比较初级的面向实验的软件系统，功能还比较简单，需要下一步深入的研究与完善。

结 论

基于软件的多投影拼接显示系统以其系统构建简单、后期使用维护方便等优点越来越得到大众的认可，在视频会议、模拟仿真、大数据展示等领域有着越来越广泛的应用。对相关课题的研究也越来越多，许多研究都是基于昂贵的实验器材和基于付费的第三方软件来搭建相关系统。本人在对前人的研究成果进行学习的基础上，基于实验室现有条件，着力于实现低成本、容易实施、同时能满足要求的多投影拼接系统。通过相关算法研究和程序编写构建起包括两台投影仪、三台主机、数码相机在内的投影拼接试验系统，实验表明本系统在几何校正、亮度校正方面均能满足一定要求。

本文通过对多投影仪拼接技术进行了深入的研究，结合实验室的设备条件，完成了两台投影仪的拼接显示软、硬件系统，具体的工作总结如下：

(1)对面向平面的投影拼接几何校正方法进行了研究，使用投影特征点的方法引入简化的几何校正基本公式，把相机放置于观察者最佳位置，用拍照的方法代替人眼“观察”特征点信息。在具体实施过程中，提出特征点照片前期处理的方法、特征点扫描时的四邻域扫描方法等措施，实现了一种较为便捷的几何校正流程与方法。

(2)分析图像处理中的三维重构中结构光编码方法，提出一种适用于曲面投影拼接的基本方法。和平面的特征点方法类似，把投影仪坐标系的每个特征点进行有规律的编码，提高特征点的密度，更好的记录曲面投影下图像的形状位置变化信息。通过编程实验，满足一定要求，有需要进一步研究的价值。

(3)对投影拼接系统重叠区域的亮度过高问题进行解决，采用 Alpha 蒙版图像与原图像融合输出的方法，降低输出图像的透明度，实现在视觉上对重叠区域进行亮度有效降低。

(4)对多投影的硬件组成的关键部分：投影仪、主机显卡、相机等进行了详细的调研，并对投影仪相关内容在文中给予介绍，详细解释了投影仪的评价参数，并给出简单的选型参考。最终，通过详细的调研与选型给出我们构建的投影拼接实验的硬件系统。

(5)通过 Server/Client 构架和模块化编程的原则，对本文的多投影拼接软件系统部分针对主机和客户机分别按照模块化原则进行程序了编写。在实现目标功能的前提下，为系统以后的修改和版本的升级做好基础。最后对各个模块的代码实现进行了简单的介绍。

多投影拼接技术的研究具有非常重要应用价值,本文介绍的多投影仪拼接显示系统功上已基本实现,但是仍有许多不足之处,有待下一步改进。为了对我们的投影拼接系统在硬件和功能上进一步的扩展和丰富,今后的工作方向可以着重放在以下几个方面:

(1)由于客观原因我们仅对由两台投影仪组成的投影拼接系统进行了相关理论叙述和具体实验。但在现实环境中所需要的投影仪数目不仅仅为固定的两台,随着环境不同,投影仪数目、排列方式等均有不同要求。怎样在两台投影仪的基础上进行扩展实现更多投影仪组成的多投影拼接系统需要进一步的理论研究与实验探索。

(2)在几何校正实施阶段,编码显示特征点图像和拍照在整个程序的实施过程中占据时间较多,尤其是曲面几何校正,如果投影仪分辨率为 1280×800 ,那么一台投影仪所拍照片数目就为42张,如果随着系统改进投影仪数目增多,所花时间会更多,如何有效提高相机的拍照效率是应该考虑的改进方向。

(3)在校正实施过程中我们要求尽量遮蔽实验室中所有光源,但是这种要求在具体的应用环境中能否真正实现还是一个问题,所以下一步我们要增加系统对环境光影响的剔除功能。

(4)由于目前系统功能还不够丰富,在程序编写方面我们只针对相关实验编写了代码,形成了简单的多投影拼接软件程序,还没有推出成熟的便于使用的软件系统,在按照上面论述对程序功能进一步优化后则需要推出正式的软件系统。

本文虽然对多投影系统相关内容提出了自己的方法并进行了实现,但是相关研究和探讨还是远远不够的。在大数据、虚拟现实、互联网+等科技前沿的大环境下,随着投影仪、计算机技术的快速发展,展望未来的多投影拼接显示系统应该是更加智能化、图像显示效果更加图像绚丽、功能更加丰富。这就要求我们深入学习现有技术各种优点,研究出各种新的相关技术和算法。

参考文献

- [1] M.Hereld, I. Judson, and R. Stevens. Instruction to Building Projection-based Tiled Display Systems[J].IEEE Computer Graphics and Applications, July/August 2000, 22-28.
- [2] 张军,王邦平,李晓峰. 多投影仪显示系统异形重叠区域的边缘融合方法[J]. 四川大学学报(工程科学版). 2010(01).
- [3] Brown M, Majumder A, Yang R. Camera-based calibration techniques for seamless multi-projector displays[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2005, 11 (2): 193-206.
- [4] Wang Xiu-hui. Research on the collaboration of multi-projector display wall and the three-dimensional interactions techniques[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.
- [5] Li Chao, Lin Hai, Shi Jiao-ying. A survey of multi-projector tiled display wall construction[C].Third International Conference on Image and Graphics, 2004: 452-455.
- [6] Huang Miao. Multi-projector display system[D].Hangzhou: Zhejiang University, 2010.
- [7] Leigh J, Johnson A, Renambot L. Scalable resolution display walls [C]. IEEE Proceedings. 2013,101 (1):115-129.
- [8] Majumder A, Sajadi B. Large area displays: the changing face of visualization [C]. IEEE Computer, 2013,46(5): 26-33.
- [9] Ebert A, Thelen S, Olech P, et al. Tiled++:an enhanced tiled hires display wall [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics,2010,16(1) : 120-132.
- [10] Roman P, Lazarov M, Majumder. A Scalable distributed paradigm for multi-user interaction with tiled rear projection display walls[J].IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics,2010,16(6): 1623-1632.
- [11] Sajadi B, Majumder A. Auto calibration of multi-projector CAVE-like immersive environments[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2012,18(3): 381 -393.
- [12] 王志刚. 基于集群的大屏幕显示系统的设计与实现.[D].青岛大学.2008.
- [13] 马列. 基于照相机技术的多重投影大尺度显示系统中的颜色校正.[D].大连理工大学, 2006.
- [14] E.S.Bhasker, P.Sinha, and A.Majumder. "Asynchronous Distributed Calibration for Scalable Reconfigurable Multi-Projector Displays." IEEE Transections of Visualization and Computer Graphics (TVCG) 12:5 (2006), 1101-1108.
- [15] Princeton Display Wall. <http://www.cs.princeton.edu/omnimedia/>.
- [16] 王修晖,华炜,林海,等. 面向多投影显示墙的画面校正技术[J].软件学报,2007,18(11): 2955-2964.
- [17] 吕品, 张金芳, 王宇心. 多投影仪无缝拼接显示中的颜色校正技术比较研究[J]. 中国图像图形学报,2008,13(7):1272-1280.

- [18] 曹双喜,陈福民. 多投影仪拼接显示的实现[J]. 计算机工程应用, 2005, 41(2): 84-86.
- [19] Jung H, Lee Y, Yoon P, et al. Radial distortion refinement by inverse mapping-based extrapolation[C]. International Conference on Pattern Recognition(ICPR), 2006, 25(4): 24-33.
- [20] Luo Jian-li, Qin Kai-huai, Zhou Yan-xia. Feature-point detection and geometry calibration for an autostereoscopic tiled display system using multiple projectors[J]. Journal of Acta Electronica Sinica, 2010, 38(8): 1729-1735.
- [21] Johnson T, Welch G, Fuchs H, et al. A distributed cooperative framework for continuous multi-projector pose estimation[C]. IEEE Virtual Reality, 2009: 35-42.
- [22] Ramcher, Raskar, Jeroen van Baar, Paul Beardsley, Thomas Willwacher, Srinivas Rao, and Clifton Forlines. Lamps: Geometrically Aware and Self-configuring Projectors. ACM Transaction on Graphics (SIGGRAPH2003), 22(3): 809-818, 2003.
- [23] Oliver Bimber, Ramesh Raskar. Spatial Augment Reality-Merging Real and Virtual Worlds [M]. AK Peters, Ltd, 2004: 93-108.
- [24] Yuqun Chen, Douglas W. Clark, Adam Finkelstein, Timothy C. Housel, and Kai Li. Automatic Alignment Of High-Resolution Multi-Projector Displays Using An Un-Calibrated Camera. Proceeding of IEEE Visualization 2000, Salt Lake City, Utah. October 2000.
- [25] Han Chen, Ruhul Sukthankar, Grant Wallace, and Kai Li, Scaleable Alignment of Large-Format Multi-projector Displays Using Camera Homography Trees. In Proceeding of IEEE Visualization 2002, pages 339-346, 2002.
- [26] 张号, 贾庆轩, 孙汉旭, 等. 一种多通道曲面投影系统的几何校正方法[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(Suppl.2): 493-496.
- [27] 沈权. 多投影仪自主几何拼接技术[D]. 浙江大学. 2010.
- [28] 张超. 面向多通道的自由曲面投影校正技术研究[D]. 长春理工大学. 2010.
- [29] Harville M, Culbertson B, Sobel I, et al. Practical methods for geometric and photometric correction of tiled projectors[C]. IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshop, 2006: 17-22.
- [30] Lv Pin, Zhang Jin-fang, Wang Yu-xin. A comparative research of photometric calibration techniques in seamless multi-projector display[J]. Journal of Image and Graphics, 2008, 13(7): 1272-1280.
- [31] Sajadi B, Lazarov M. Color seamlessness in multi-projector displays using constrained gamut morphing[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2009, 15(6): 1317-1325.
- [32] Maureen C. Color and Brightness Appearance Issues in Tiled Displays. Computer Graphics and Applications, IEEE. 21(5), 2001, Page: 58-66.
- [33] R. Raska, J. vanbaar, P. Beardsley. ILamps: Geometrically Aware and Self Configuring Projectors. ACM Trans Graphics. 2003, 22(3): 809-818.
- [34] A. Majumder, R. Stevens. Color Non-uniformity in Projection-Based Displays: Analysis and

- Solutions. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics.2004, 10(2): 177~188.
- [35] Aditi Majumder, David Jones, Matthew Crory, Michael E, PaPka, and Rick Stevens. Using a Camera to Capture and Correct Spatial Photometric Variation.
- [36] 贾庆轩, 阮瑞卿, 孙汉旭等. 多投影面显示系统亮度均衡的实现[J]. 系统仿真学报. 2006,18(2): 2003.478-482.
- [37] 杨国平, 陈福民.多投影仪 Alpha 融合的后期 Gamma 校正[J]. 计算机应用与软件, 2009, (1): 232-233.
- [38] 俞凌云, 王毅刚, 王亢. 大屏幕无缝拼接系统的应用软件平台开发[J]. 计算机应用, 2008(09).
- [39] 陕亮. 基于云计算的多投影系统项目管理与安全设计[J]. 计算机工程, 2014, 2014(04).
- [40] 黄淼. 多投影仪拼接显示系统[D]. 浙江大学. 2010.
- [41] 杨键, 张敏. 基于 OpenGL 的纹理贴图技术[J]. 软件导刊. 2011(03).
- [42] 杨成. 基于纹理的计算机笔迹识别算法探讨[J]. 中国科教创新导刊. 2011(08).
- [43] 初苗, 田少辉. 基于 OpenGL 的三维物体纹理贴图研究[J]. 科技信息. 2009(04).
- [44] 张洁, 刘小琴. 基于 OpenGL 的纹理映射的实现[J]. 运城学院学报. 2007(05).
- [45] 董斌, 李颖鹏, 等. 基于空间二进制编码的 3-D 形貌测量方法[J]. 光学技术, 1999, 25(5): 33 ~ 36.
- [46] 张吴明, 钟约先, 由志福, 等. 基于结构光编码的方法[J]. 光学技术, 2002, 28(5): 404 ~ 406 .
- [47] 刘顺涛, 骆华芬, 陈雪梅, 徐静. 结构光测量系统的标定方法综述[J]. 激光技术. 2015(02).
- [48] 于晓洋, 单鹂娜, 曹沈楠, 吴海滨. 结构光时间编码技术进展[J]. 哈尔滨理工大学学报. 2010(01).
- [49] JIA Peirong, KOFMAN Jonathan, ENGLISH Chad. Real-time Full-field 3-D Surface-shape Measurement Using Off-the-shelf Components and a Single Processor. Sixth International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling. 2007.
- [50] 李托拓, 胡锋, 耿征. 基于结构光的三维成像技术[J]. 网络新媒体技术. 2012(01).
- [51] Jin-Ho Lee, Juyong Park, Dongkyung Nam, Optimal projector configuration design for 300-Mpixel multi-projection 3D display. Optics Express. 2013.
- [52] 黄俊春, 章炯民. 基于彩色结构光的实时三维重建[J]. 计算机应用与软件. 2009(12).
- [53] 王长波, 谢明红. 格雷编码与相移结合的双目三维重构[J]. 计算机工程. 2013(05).
- [54] 陆军, 宋成业. 基于格雷码和线移编码的结构光系统标定[J]. 光电子激光. 2012(06).
- [55] 吴晓建, 谢明, 邱香, 李红英, 邬剑飞. 格雷码性质研究[J]. 机电工程技术. 2010(09).
- [56] 孟凡辰, 陈德运, 王莉莉, 于双, 于晓洋. 多灰度级格雷码三维测量方法[J]. 哈尔滨理工大学学报. 2015(05).
- [57] 黄三发, 陈福民, 陈小灿. Alpha 在无缝投影中的应用[J]. 计算机应用与软件, 2007, 24(12): 161-162.
- [58] 霍星, 解凯. 多投影无缝拼接中 Alpha 融合的研究[J]. 北京印刷学院学报. 2014(02).
- [59] 陈美华. 基于摄像机反馈的多投影自动无缝拼接校正[D]. 哈尔滨工业大学. 2013.

- [60] 刘全恩.大屏幕投影机技术发展趋势[J].电视技术. 2013(04).
- [61] 莫芽萍.DLP 技术在投影机中的原理及应用[J].电子制作.2014(12).
- [62] 曹森,苏贵斌. 软件开发中的设计原则[J].软件导刊.2012(01).

攻读硕士期间发表的学术论文

- 1 张亚, 樊东卫, 苏丽颖, 徐鹏飞, 崔辰州等.球幕数字天象厅多投影拼接技术究.天文研究与技术.(已录用).
- 2 苏丽颖, 张亚, 崔辰州, 樊东卫等.基于 Qt 面向不规则投影面的投影校正系统, 软件著作权, 2015SR080069.

致 谢

1990 年出生，1996 年入学，到现在硕士研究生即将毕业，一路走来经历了不少的困难与曲折，在我的硕士论文即将完成之际，感谢在我的求学路上曾经给予我关心和帮助的所有人，谢谢大家。

首先衷心感谢我的导师苏丽颖老师，是苏老师给我们提供了一个良好的学习环境，在苏老师的悉心指导下我完成了硕士研究生相关科研活动和毕业论文。在硕士研究生三年的学习生涯中，苏老师的学识渊博和谦逊随和、乐观开朗的性格给我留下了深刻的印象，这些优秀的品质使我受益匪浅，感触颇深，也是我以后学习的目标。在本论文完成之际，衷心感谢恩师对我的教导和关怀并表示我最诚挚的敬意。

感谢余跃庆老师、刘婧芳老师、丁华锋老师在我完成课题的过程中给与的指导与帮助，他们学识渊博、平易近人，给我课题的开展提供了许多宝贵的意见。

感谢中国科学院国家天文台信息与计算中心的崔辰州研究员，是您给了我开阔视野、培养能力、全面发展的机会与平台。在学科前沿您有着敏锐的洞察力；在工作生活上您有着严于律己、宽以待人风范；在学习上您对学生细致耐心的指导。感谢您对我们的付出，也祝愿您带领我们的团队取得更辉煌的成就。

感谢樊东卫师兄在课题的开展过程中给予的认真细致的指导。樊师兄极强的科研实力、对工作的认真态度、以及对于问题的分析及把握的准确度，经常带给我深深的震撼，每当我研究过程中遇到瓶颈时，您每次都能给我耐心的指导。再次感谢您。

感谢信息与计算中心的李正老师对课题相关实验的开展提供的帮助。大到投影仪、主机，小到转接头、网线，在整个实验过程中真是麻烦您太多次了，谢谢您。

感谢 China-VO 团队的谌悦、何勃亮、韩叙、李长华、李珊珊、米琳莹、滕一民、杨丝丝、曹子皇、王甲卫等所有老师和工作人员，感谢大家在学习生活上给我的关心照顾。

感谢学校实验室的所有成员：田浩、高慧芳、李小鹏、杜峰、徐鹏飞、吴秋丽、李向军、吴方朋、张海晓、朱舜坤、李清清、宋文明、戴莹等等一群热爱科研的有志青年，我们共同成长，互帮互助，建立起了深厚的友谊。感谢舍友王家鹏、赵相峰、王立卡，我们一起分享生活中的酸甜苦辣，一起度过了有意义的生活。祝福大家以后的工作生活一切顺利。

感谢重庆梧台科技发展有限公司的朱鸣罡、段毅、刘慎国等对我在课题中给予的帮助。祝愿梧台科技越来越强大。

感谢我的父母、哥嫂，是你们的支持让我能够全身心的投入到学习生活，你们永远是我坚实的后盾。您们让我继续攻读博士的期待暂时搁置一下，等以后有机会继续努力吧。

感谢我的女友，刘娟，感谢你的陪伴与鼓励。

感谢我的爷爷、奶奶，您们一直牵挂着在外读书的我，每次回家您们总是想着给我做这样那样的好吃的。

本研究课题得到了北京市教委青年拔尖人才培养计划、中国科学院信息化专项(XXH12503-05-05)、国家自然科学基金委员会与中国科学院天文联合基金(U1231108)、科技部科技基础性工作专项(2012FY120500)、北京市科技专项“互动式数字天象厅的研发和集成设计”资助，在此表示感谢！

最后感谢各位专家老师在百忙之中对我的论文进行评审，感谢参加论文答辩的各位老师。

感谢自己的选择。

张亚

2016年5月