

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1905164

六通道球幕投影图像畸变校正及融合板设计

杨树财, 于松, 苏帅, 王天娇

(哈尔滨理工大学工程训练中心 哈尔滨 150080)

摘要:多通道球幕投影技术是一种重要的信息可视化技术,针对投影图像易发生图像畸变以及图像重合区域会产生亮带等问题,提出一种基于图像校正原理的图像融合处理方法。首先分析投影图像之间的几何位置关系,采用网格划分法对畸变图像进行校正,实现边缘图像的网格位置拼接对齐;然后采用边缘衰减算法来对图像进行边缘融合处理,并且设计出一种球幕投影融合用的遮光板装置,对多源投影的球幕中所产生的重叠光路进行过滤,消除多源投影中球幕图像上的亮带,使投影图像的整体亮度保持均匀,最后通过实验对投影图像的边缘融合效果进行分析,结果表明,实验选取的5组图像峰值信噪比平均值为33.550 dB,证明该方法具有较好的边缘融合效果。

关键词:球幕投影;图像融合;遮光板;峰值信噪比;灰度值

中图分类号: TH74 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 140.30

Distortion correction of six-channel dome-screen projection image and design of fusion plate

Yang Shucan, Yu Song, Su Shuai, Wang Tianjiao

(Engineering Training Center, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: The multi-channel dome-screen projection is an important information visualization technology. Projection images are prone to image distortion and bright bands are generated in the coincident region of the image. To solve these problems, an image fusion processing method based on image correction principle is proposed. Firstly, the geometric position relationship among projection images is analyzed, and the distorted image is corrected by grid division method to realize the grid position splicing and alignment of edge images. Then, the edge attenuation algorithm is used to fuse images. The shading plate device for spherical screen projection fusion is designed, which filters the overlapping light paths generated in the dome-screen of multi-source projection. In this way, the bright bands on the dome-screen image in multi-source projection can be eliminated, and the overall brightness of the projection image uniform is reserved. Finally, the edge fusion effect of the projection image is analyzed by experiments. Results show that the average peak signal-to-noise ratio of five groups of images selected by the experiment is 33.550 dB, which prove that this method has a good edge fusion effectiveness.

Keywords: dome-screen projection; image fusion; shading plate; peak signal-to-noise ratio; gray-scale value

0 引 言

随着科技的发展,人们对信息可视化方式的要求逐渐提高,为满足人们的需要,球幕投影技术应运而生,这项技术改变了以往投影图像只能以平面形式展示的原则,由于球幕投影具有强烈的立体感、视觉效果以及沉浸

感,如今已经越来越多地运用在生活的各个方面,如各类空间模拟训练、广告传媒、家庭影院等大型场所,逐步成为为数不多的且能满足大面积投影要求的必不可少的显示门类。球幕投影中需使用多个投影仪(即多源投影)来将图像投射到球幕上,在进行多源投影的过程中,会在球幕上出现多个重叠光路及图像的几何失真,球幕上出现重叠光路区域附近的图像会显现出亮暗不一的现象,

收稿日期:2019-05-17 Received Date:2019-05-17

* 基金项目:国家自然科学基金(51875144)项目资助

使呈现的图像上出现浅白色亮带,造成投影图像的不完整,从而导致了其投影效果不佳,极大地影响观看效果。因此,对于多通道投影光路投影在球幕上因重叠光线产生的亮暗不一问题,目前主要有3种解决途径:单一硬件边缘融合技术、单一软件边缘融合技术以及硬件与软件相互结合的边缘融合技术。陈静杰等^[1]研究了A320模拟机遮光板的模块化设计,降低了操作板模块与控制板模块间的相对依赖连接,实现了功能与结构的分离,设计了独立的通信模块,通过操作实验证明可大大提高模拟机遮光板通信的可靠性;朱维斌等^[2]为提高小模数齿轮视觉检测系统的检测精度,提出一种亚像素边缘检测算法,同时,采用邻域特性分析法初定位、一维灰度矩精定位的方式在保证检测精度的基础上提高了算法的检测速度和检测精度;张沛沛等^[3]提出一种使用普通投影仪与计算机相结合的图像拼接方法,利用软件处理方法实现对多通道大投影图像的无缝拼接,结果证明这种方法具有一定的可行性和有效性;刘峰等^[4]通过显著性检测的视觉权重图,对不同分解层赋予不同的权重值,提高了图像的对比度,并利用可变参数的双边滤波器进行多尺度分解,获得了融合图像更多细节信息,同时还降低了融合时间;Kang等^[5-6]为获得图像融合区域的更多细节,提出一种非下采样轮廓波变换的图像融合方法,通过的移除原图像聚焦区域并采用不同决策因子对非聚焦区域进行处理,再将聚焦区域与非聚焦区域相融合从而获得了更加清晰的图像;冯玉芳等^[7]提出一种基于改进卷积神经网络的红外可见光图像融合方法,通过对原始图像的低频子带和高频子带分别进行加权平衡融合处理,得到了较好的融合图像;蔡怀宇等^[8]提出一种结合边缘检测的快速SIFT图像拼接方法,将图像分割出细节丰富的子区域,对子区域特征点进行配准,利用Sigmoid型函数权重的图像融合方法,实现了图像的无缝拼接融合;Yu等^[9]分析了单元三基色对同一输入信号的不同显示亮度,将原始图像分解为RGB 3个分量的图像,然后对每个分量的图像进行小波分解,从每个分量图像中提取颜色和边缘的低频特性,最终由两个特征完成图像的检索,实验表明这种检索的方法精度更高,速度更快;肖朝等^[10]提出了一种二次几何校正算法,对视景画面的顶点坐标进行几何校正,在此基础上对纹理进行几何校正,并进行相应的理论推导和程序设计;杨勇等^[11]通过高斯滤波器卷积全色图像提取融合图像细节,将注入系数与提取的细节相乘注入到采样后的多光谱图像中,最终获得高光谱分辨率与高空间分辨率的融合图像;谢晶梅等^[12]针对图像拼接中出现的图像拼接缝隙设计出一种同时消除水平方向和垂直方向的拼接缝隙的算法,通过仿真实验证明拼接的图像能够达到良好的视觉效果;王佳慧等^[13]提出一种用于平视视景系统的图像融合方法,将图像进行拉普

拉斯金字塔变换后分别对高频层和低频层进行融合,取得了良好的融合效果;宣昊等^[14]采用计算机编程技术开发了多通道视景仿真平台,并用Vega软件实现了动画显示效果,实现了三通道渲染场景的无缝拼接;Chen等^[15]通过分析电容层成像的基本原理和图像算法,提出了一种基于小型波分解的低频域边缘特征检测的图像融合算法,并运用LBP算法和Landweber算法进行图像融合,再利用局部梯度、局部信号强度和加权平均算法处理融合图像的低频系数以及图像高频系数,实验仿真结果表明,这种方法具有更高的精度。Zhao等^[16]通过组合图多尺度边缘的离散型小波变换提出了一种基于生物医学的图像融合方法,该方法应用于生物医疗决策和分析图像处理领域的可信度很高。Li等^[17]基于图像融合技术采用多结构和多尺度的形态学自适应算法,合理地考虑了降低噪声并保留边缘的细节特征Perumal等^[18]。将过滤模板值被用于选取边缘值,这个阈值通过输入的图像的直方图获取,通过提取边缘信息最终完成图像的融合,使融合的图像噪声更小并且边缘更光滑。Zhu等^[19]研究了噪声图像的边缘识别方法,通过分析和研究数学形态学图像处理的基本原理、结构边缘识别方法以及数字图形处理中的结构元素提出一种基于多结构元素形态以及图像融合的边缘识别方法,通过仿真并于传统的边缘识别方法进行比较,这种方法能有效地消除图像噪声并得到优质的融合边缘。Muduli^[20]基于无损检测推导出一种边缘跟踪算法,结合了两种不同的边缘跟踪算法双曲正切滤波和Canny边缘检测算法的优点,使模型能够精确地检验出图像的边缘。董祉序等^[21]基于激光三角法测量原理,分析激光束和汇聚光斑质心对测量精度影响,建立测量误差的理论模型,并用实验验证使用该模型极大程度提高LDS测量精度。杜永生等^[22]设计了一种质量度量耦合颜色校正的多曝光图像融合算法,使图像具有更好的融合视觉质量,并更好保持图像细节和校正曝光融合图像颜色。

总之,在对多通道球幕投影的研究中,大部分都是通过软件或者硬件对图像拼接、图像变形以及图像噪声进行矫正处理,但是在对图像融合的研究中,只有单一的对重叠区域亮度的处理,并没有人研究过不同场景下图像重叠区域亮度的调节。因此,本文对投影仪的分布位置及投影方式进行设计,并针对图像的畸变、失真对其进行优化处理,完成图像的几何校正,对于光路叠加部分产生亮带的问题,则利用边缘衰减算法进行边缘融合处理,可在亮场景下消除亮带,采用光学融合原理,设计出一种用于球幕投影融合的遮光板,通过改变光路重叠区域的通光量,能够有效消除暗场景下出现亮带的问题,经过以上设计和优化处理可以实现球幕投影在不同场景下的图像融合。

1 投影仪位置分布及图像几何校正

1.1 投影位置关系

根据投影仪投影角度以及投影图像的长宽比为1.16:1,利用投影仪的投射光线使整体球形屏幕铺满图像,且保证图像不会失真,并同时保证亮度和分辨率都能达到观众肉眼所能清晰识别且不会产生视觉错位的要求,根据球幕的要求以及对光路的理论分析,球幕如图1所示。确定系统为六通道显示系统,其分布方式采用“上三下三”,即上下各分布3个投影仪的投影光源,且采用对称方式分布,其投影仪与球幕的相对位置分布如图2所示,投影方式采用“交叉”投影即下投影仪水平投影、上投影仪向下投影,其两两投影仪的投影光路关系如图3所示,从图中可以看出各投影仪投影光路之间的交叉区域会由于光路的叠加产生区域亮带,特别是处于4个光路叠加的区域,其亮带更加明显。按照模拟器结构的整体布局以及相应投影光路的,把6台投影仪分别布置在球幕的后上侧,并每台投影仪下侧安装维护平台。

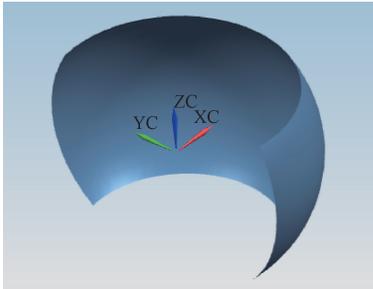


图1 模拟球幕

Fig.1 Simulated dome-screen

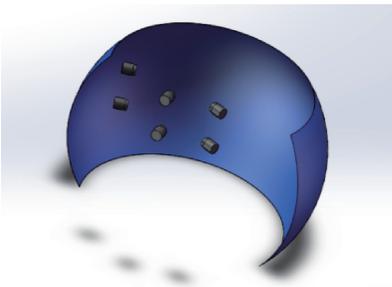


图2 投影仪与球幕的相对位置分布

Fig.2 Relative position distribution of projector and dome-screen

1.2 图形几何对齐校正

图形的几何特征可通过低级特征及高级特征来描

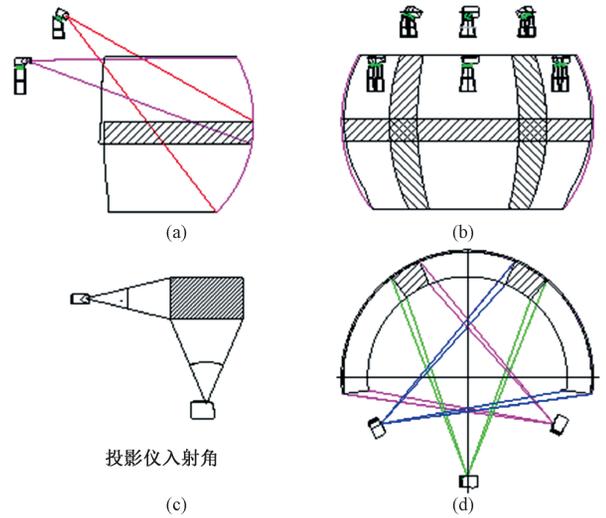


图3 光路分布

Fig.3 Optical path distribution

述,其中低级特征包括边和角,高级特征可描述为物体的识别与图像特征之间的关系。在多个投影仪同时投影到球幕上时,会发生图像的重合,在普通平面投影中,图像都能均匀布满投影屏幕,且不会产生投影图像的几何错位,由于球幕投影相对于平面投影具有投影的不规则性,投影光线不能等距离地分布在投影屏幕上,从而导致投影的图像本身存在一定的错位,并产生了相应的图像畸变,因此,采用“网格化”方法对错位的几何图像进行校正,分析相互投影图像之间的几何位置关系,实现边缘图像的网格位置拼接对齐。

根据设计要求,球形屏幕直径5 m,上下视角分别为上30°、下45°,水平视角两边关于Z轴对称210°,由投影仪分布方式即可确定每台投影仪所投射的角度和面积,所以将整个球形幕以5°为间隔,采用“经纬”度的方式划分网格,网格划分结果如图4所示,投影图像相互重叠的区域所占的网格区域如图5所示。从图中可以看出,在“经线”方向上,图像重叠区域所占的角度大小约为15°左右,在“纬线”方向上,图像重叠区域所占的角度为10°。投影仪所投射出的原始图像的网格点和所需的目标图像的网格点位置关系如图6所示,基准图像以及畸变图像如图7所示。本文中采用两种函数分别对基准图像以及畸变图像进行描述,最后得到图像的畸变关系式,通过求解畸变关系式,从而对畸变图像进行校正。

设两幅图像几何的畸变关系可描述为:

$$\begin{cases} x' = h_1(x, y) \\ y' = h_2(x, y) \end{cases} \quad (1)$$

通常 $h_1(x, y)$ 和 $h_2(x, y)$ 可用多项式(2)来近似表示为:

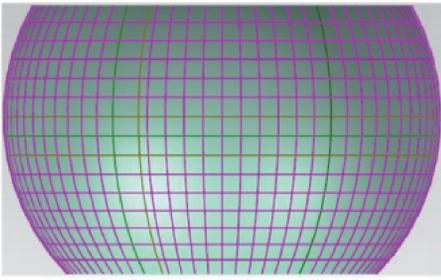


图 4 网格化球幕
Fig.4 Meshed dome-screen

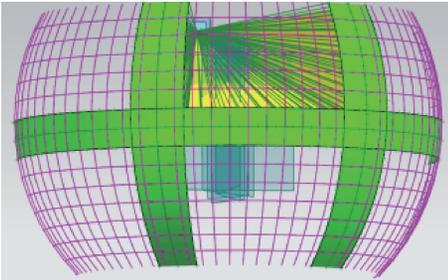


图 5 模拟球幕重合区域的“经纬”角度
Fig.5 Longitudinal and latitude angle of simulated dome-screen overlapping area

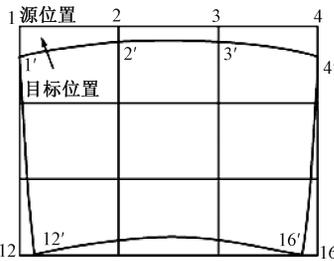


图 6 原始图像与目标图像的网格点位置关系
Fig.6 The position relation of grid points between the original image and the target image

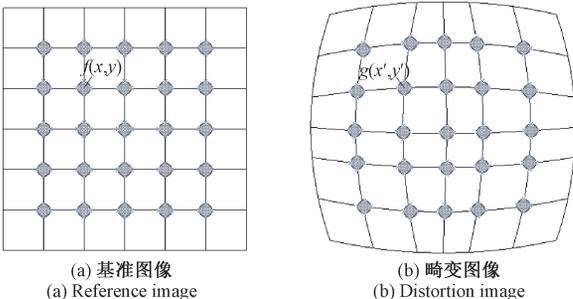


图 7 图像畸变
Fig.7 Image distortion

$$\begin{cases} x' = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-i} a_{ij} x^i y^j \\ y' = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-i} b_{ij} x^i y^j \end{cases} \quad (2)$$

当 $n=2$ 时,畸变关系式(3)为:

$$\begin{cases} x' = a_{00} + a_{10}x + a_{01}y + a_{20}x^2 + a_{11}xy + a_{02}y^2 \\ y' = b_{00} + b_{10}x + b_{01}y + b_{20}x^2 + b_{11}xy + b_{02}y^2 \end{cases} \quad (3)$$

式(3)有 12 个未知数,需要至少 6 个点的坐标来构建方程组,从而解出函数。

间接法是一种从输出的像素出发,每次可将一个输出像素映射到输入图像中,从而得到其灰度值,这一方法也被叫做反变换法。设在基准坐标系中,恢复图像的像素为等距网格的交叉位置点,从网格交叉位置点处坐标 (x, y) 出发,得到数个已知点,并求出相应的未知数。

根据式(3)可计算得到每个格网点在相应畸变图像中的位置坐标 (x', y') , 即:

$$\begin{aligned} x' &= h_1(x, y) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-i} a_{ij} x^i y^j \\ y' &= h_2(x, y) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-i} b_{ij} x^i y^j \end{aligned} \quad (4)$$

由于 (x', y') 一般情况下并非整数,不会处在畸变图像的像素中心位置,因此不可以直接判断出此点的灰度值,仅能够通过畸变图像利用这一像素点周围像素的灰度值采用内插法,解得此像素点的灰度值,然后当作与之对应的网格点的灰度值,进而进行图像的校正。

灰度插值也是图像重采样的过程^[23],首先利用基准图像区域里的像素元点 F 的位置反过来求解该点在原始畸变图像区域种的共轭点 $G(x, y)$,再通过三次卷积法求出共轭点 $G(x, y)$ 的灰度值,最后将共轭点的灰度值作为基准图像区域对应的点 $f(x, y)$ 。

三次卷积法是采用三次多项式 $S(x)$ 来逼近理论中最佳插值函数 $\sin(x)/x$ 的一种方法,该方法的数学表达式为:

$$\begin{cases} 1 - 2|x|^2 + |x|^3 & 0 \leq |x| < 1 \\ 4 - 8|x| + 5|x|^2 - |x|^3 & 1 \leq |x| < 2 \\ 0 & |x| \geq 2 \end{cases} \quad (5)$$

利用像素点 (x, y) 周围 16 个点的灰度值加权内插求出该点的灰度值,计算公式如下:

$$f(x, y) = \mathbf{A} \times \mathbf{B} \times \mathbf{C} \quad (6)$$

其中, $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}$ 分别表示如下:

$$\mathbf{A} = [S(1+v) \quad S(v) \quad S(1-v) \quad S(2-v)]$$

$$B = \begin{bmatrix} f(i-1, j-1) & f(i-1, j) & f(i-1, j+1) \\ f(i, j-1) & f(i, j) & f(i, j+1) \\ f(i+1, j-1) & f(i+1, j) & f(i+1, j+1) \\ f(i+2, j-1) & f(i+2, j) & f(i+2, j+1) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} f(i-1, j+2) \\ f(i, j+2) \\ f(i+1, j+2) \\ f(i+2, j+2) \end{bmatrix}$$

$$C = [S(1+u) \quad S(u) \quad S(1-u) \quad S(2-u)]$$

向量 A, C 中 u, v 分别表示为: $u = x - [x], v = y - [y]$,

$[\]$ 表示取括号内数值的最大整数部分。

2 图像拼接融合

2.1 亮场下图像边缘融合处理

投影图像重合区域不仅会发生图像的错位和畸变,同时也存在图像强度和颜色的一致,导致重合区域的图像亮度高于其他区域。

使图像融合的方法有很多,这里采用边缘衰减算法来对图像进行边缘融合处理,以使整个投影画面的亮度基本保持一致,实现投影图像的无缝拼接。

图8所示为多通道投影系统拼接融合示意图,为了方便讨论,此处仅做两个投影仪拼接分析。左投影仪投影出画面为函数 $F_L(x)$,其拼接融合函数为 $f_1(t)$,右投影仪投影出画面为函数 $F_R(x)$,其拼接融合函数为 $1-f_1(t)$ 。为了使投影画面具有连续性,要求左右两台投影仪在融合带区域画面相同,即图9中 $F_L(x), F_R(x)$ 在融合带曲线相同。

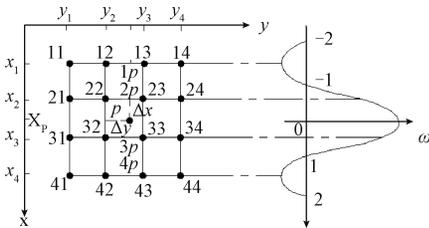


图8 取样点示意图

Fig.8 Schematic diagram of sampling points

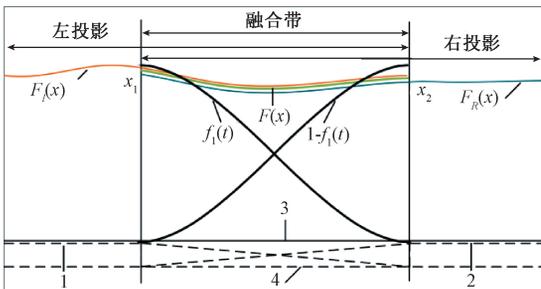


图9 多通道投影系统拼接融合

Fig.9 Montage fusion of multi-channel projection system

假设此时已经进行了精确的几何校正、亮度校正等,希望达到的融合效果为:

$$F(x) = f_1(t)F_L(x) + [1 - f_1(t)]F_R(x) \quad (7)$$

式中: $x \in (x_1, x_2)$, $t = \frac{d_1}{d_1 + d_2}$, d_1, d_2 分别为融合带区域内某个像素点到左、右边界的距离。

人类的视觉系统能够使边缘对比度效果得到加强,称之为马赫带效应。故要求图像融合部分具有较平缓的过渡效果。将重合区域图像的每个像素都乘以式(8)所示融合函数。

$$f_{左} = \frac{1}{2}(\cos\pi t + 1), f_{右} = 1 - \frac{1}{2}(\cos\pi t + 1) \quad (8)$$

式中: $t \in [0, 1]$, 融合函数曲线如图10所示,将左侧投影仪图像重合区域的RGB分量分别乘以 $f_{左}$,右侧投影仪图像重合区域的RGB分量分别乘以 $f_{右}$ 。图11所示为左侧融合函数斜率,反映出融合函数曲线变化快慢程度,图中可以看出,在两端点处的斜率为0,可以更好与边界结合;在 $t=0.5$ 处的斜率最大,整个变化过程较为缓慢,融合过程较为均匀,适合作为融合函数。其融合效果如图12所示。

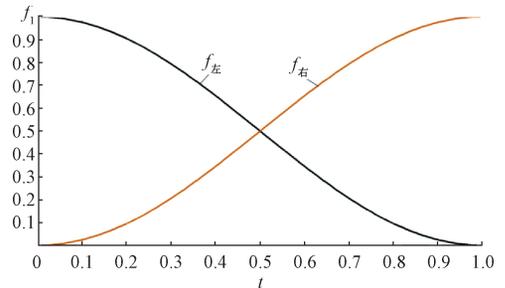


图10 融合函数曲线

Fig.10 Curve of fusion function

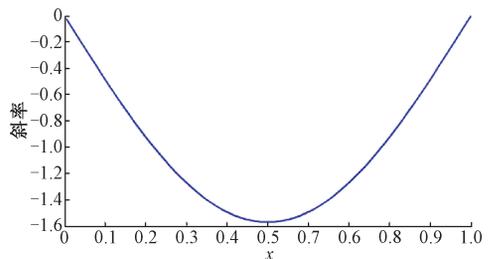


图11 左侧融合函数斜率

Fig.11 Slope of left fusion function

采用边缘衰减算法处理后,经过两个通道的图像融合处理系统分别处理后再投影出的图像虽然可以拼接融合在一起,而且重合区也没有原来的亮带出现,但取而代之的是,重合区却出现了一条暗带,此暗带在重合区域中央处颜色最暗,往两侧区域则越来越亮。出现这种现象

是因为之前边缘融合的实现并非是对像素亮度值的调节,而是对每个像素的像素值进行处理,因此,需要对亮度进行调节。

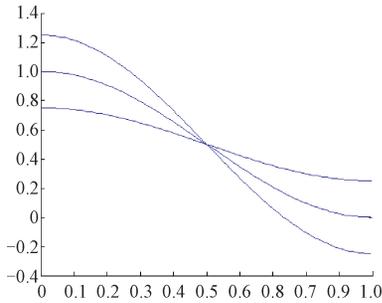


图 12 融合效果
Fig.12 Fusion rendering

对亮度进行调节,需要引进亮度系数 a 对函数进行控制,对式(8)进行改进,得到更加好的融合效果。

$$f_{左} = \frac{1}{2} + a \cos \pi t, f_{右} = \frac{1}{2} - a \cos \pi t \quad (9)$$

电子融合在亮场景下处理效果较好,但在暗场景下会出现无法消除亮带的情况,则需要借助光学融合,直接对各通道投射出的图像边缘的通光量进行调节,以降低融合带亮度,达到夜航情况下消除亮带目的。

2.2 暗场景下融合板设计

由于球形幕上下视角不对称,水平视角对称,6 台投影仪中同一高度的 3 台投影仪投射距离相同;不同高度投影仪投射距离不同,所以应该将 6 台投影仪分为两组,即同一水平高度为一组。两组投影仪中应该分别进行光路分析。

同一组投影仪中,只需分析中间投影仪即可;首先分析投影仪 5 号投影光路,根据投影仪投影角度,以 XOZ 平面为对称平面,以投影仪发光点为中心,左右取相同的角度即取对称的两条“经线”,其与中心所形成的夹角即为投影仪水平投影角度,“纬线”与中心形成的曲面即为投影仪垂直投影角度。在“经纬线”取一定数量的点,连接“经纬线”上的点与发光点,形成的曲面即为光路;图 13 所示黄色曲面为单个投影仪投影光路。

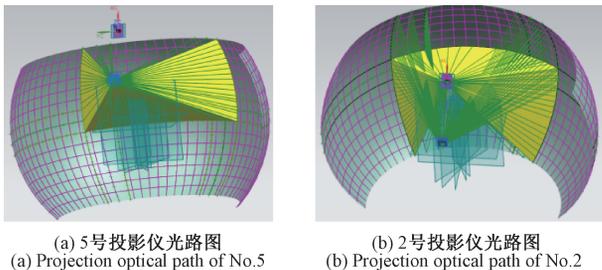


图 13 单台投影仪投影光路

Fig.13 Projection optical path of single projector

在投影仪 2 的上光线区和投影仪 5 的下光线区之间重叠形成融合带,以相同的方法即可分析所有投影仪的光路图,求出所有投影融合区,如图 14 所示球幕上黑色的线代表各个投影仪投影光线的边界线,同一高度的 3 个投影仪在水平方向会形成两个纵向融合区域,上下两个投影仪之间会形成一个横向融合区域,即绿色区域为提取的投影融合区域。

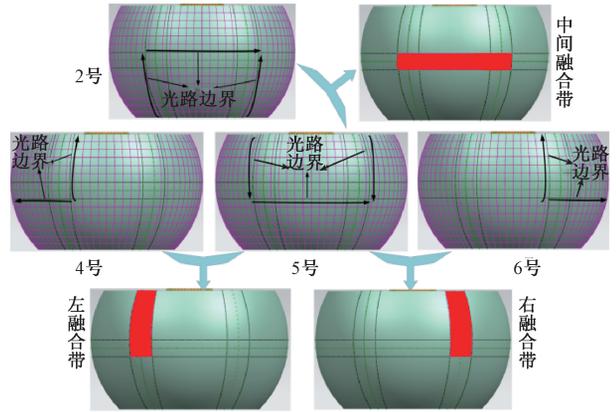


图 14 5 号投影仪融合区形成过程

Fig.14 Formation of fusion area of projector No. 5

由于整个投影球幕采用六通道投影设备全覆盖,中间的两台投影设备与同一高度的投影仪投影光路几乎相同,只是其投影的位置不同而已,所以只需要分析中间上下两台投影光路即可。首先分析 5 号投影仪投射范围内融合区域,同样如图 14 所示,4 号、5 号形成左融合带,5 号、6 号形成右融合带,2 号、5 号形成中间融合带,将 3 个融合带组合成图 2~12 融合区域。以相同的方式分析 6 个投影仪投影范围内融合区如图 15 所示。将获得的 2 号、5 号投影仪融合区反射到融合板上,获得融合板边界曲线,如图 16 所示。利用同样的方法获得 1 号、3 号、4 号、6 号投影仪融合区,进而获得所有融合板边界曲线。

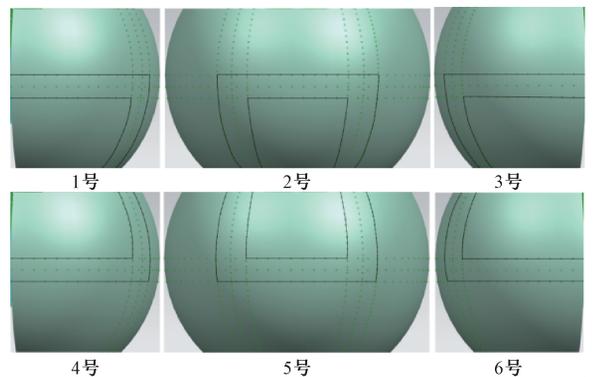


图 15 各个投影仪投影融合区

Fig.15 Projection fusion area of each projector

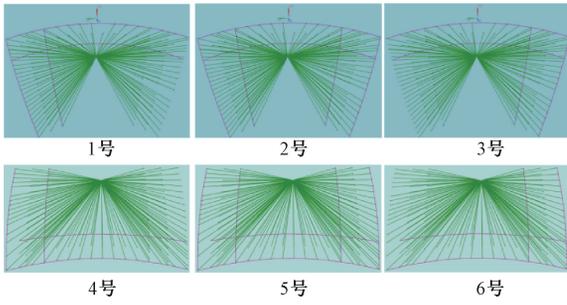


图 16 融合板边界曲线

Fig.16 Boundary curve of fusion plate

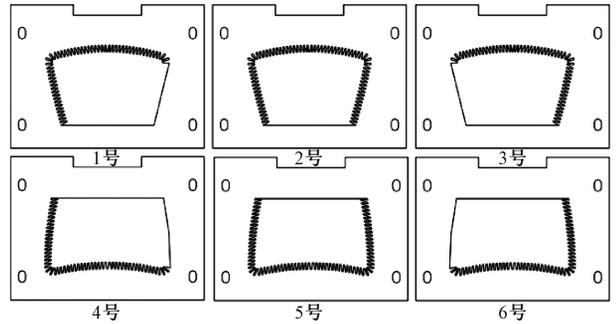


图 18 各投影仪融合板设计

Fig.18 Fusion board design drawings of projectors

在求解得到齿形分布的边界圆弧曲线后,采用分割弧长法对遮光板的齿形进行求解,如图 17 所示,边界分布曲线为近似圆弧曲线,可用圆弧的曲线方程进行描述,圆弧的分割曲线为经过圆弧圆心且斜率为 k 的 n 条直线,该条直线可用二元一次方程表示,齿形的顶部弧线与底部弧线均采用圆弧曲线进行表示,以此可得到该齿形分布的计算模型。再配合调节机构,可以精确控制融合板对投影光的遮挡,各投影仪融合板设计如图 18 所示。

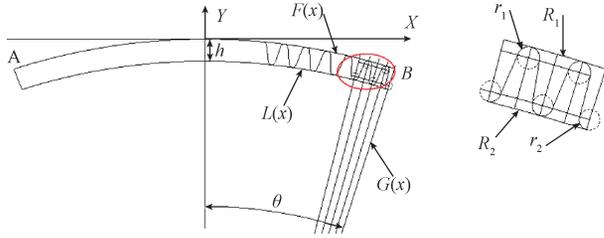


图 17 齿形设计

Fig.17 Design sketch of tooth profile

设齿形的分布曲线为 $F(x)$, 齿形顶部的分布曲线为 $L(x)$, 分割直线为 $G(x)$ 。

$$F(x) = (x - a)^2 + (y - b)^2 - R_1^2 \quad (10)$$

$$L(x) = (x - a)^2 + (y - b)^2 - R_2^2 \quad (11)$$

$$G(x) = k_n x + c \quad (12)$$

式中: a, b 为齿形分布弧线的圆心; R_1, R_2 分别为齿形分布内边界及外边界的弧线半径; k_n 为分割直线的斜率; c 是 n 与夹角 θ 的函数。

$$k_n = \frac{\pi}{2} - \left[\theta - (n - 1) \frac{\theta}{n} \right] \quad (13)$$

假设齿形根部的圆弧半径为 r_1 , 齿形顶部的圆弧半径为 r_2 , 在分割线与齿形分布曲线的交点处以交点为齿根或齿顶再分别以半径 r_1, r_2 作圆, 完成齿跟与齿顶所对应的圆后, 再分别作两圆的切线, 则可得到所需的齿形曲线。设齿形板的透光率为 γ , 则 γ 为与分割直线斜率 kn 的增量区间 $\Delta\theta$ 、齿根圆弧半径 r_1 以及齿顶圆弧半径 r_2 相关的函数。

通过大量试验获得锯齿形遮光板较优参数, 最终确定锯齿齿形参数。为了更好的配合调节机构, 需要将锯齿遮光板做成一体式, 材料选用亚克力, 且遮光面要进行亚光处理, 可有效防止光线的反射回镜头从而造成二次投影重合。

本文采用的锯齿形遮光方式是在投影仪投射出图像之后, 经过特殊的光学机构, 通过直接调整各个通道图像边缘的光强, 从而使融合带的亮度降低, 在暗场景下可以消除亮带。如图 19 所示为光学融合光强分布, 齿形融合板的作用就是采用渐变式的锯齿遮光, 使透过的光线强度均匀减弱, 曲线 1、2、3、4 分别为来自 4 个不同通道的光强经齿形遮光板过滤后的光强递减曲线, 在融合区域, 会有来自几个不同方向的光强的叠加, 使得投影在球幕上的光线亮度高于其他区域, 在经齿形板对各个通过的光强进行过滤后, 可达到最终融合的光强等于单通道投影的光线强度。如曲线 5 所示, 光强趋于平衡, 表明在暗场景下两通道投影重合区域的光强分布十分均匀, 且图像拼接整体的亮度也十分均匀, 从而使整个投影画面效果统一。

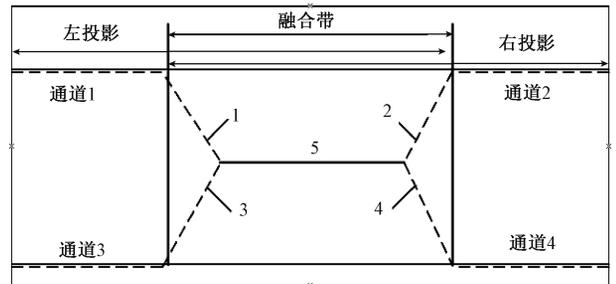


图 19 光学融合强度分布示意图

Fig.19 Schematic diagram of optical fusion intensity distribution

2.3 六通道球幕投影边缘融合效果分析

本文首先采用网格划分的方法对投影重合区域的畸变图像进行校正, 然后通过边缘衰减算法对重叠区域图像进行处理, 消除投影因图像重合而产生亮带的问题, 最

后针对暗场景下电子融合无法消除亮带的情况设计出齿形遮光板,并优化出最佳锯齿齿形参数及分布,针对如图20所示图像,综合以上处理方法,得到的投影图像如图21所示,由于显示球幕投影全图较为困难,此处仅以两台投影仪所投射出的平面投影图像融合效果为例,结果显示其经边缘融合处理后的图像重叠区域不再产生图像畸变和几何错位现象,实现了重叠区域图像的无缝拼接,并且在不同场景下均不再有明显的亮带产生,重叠区域图像的颜色和亮度也能够实现平滑过渡,整个投影图像没有出现几何失真,融合效果较好。



图20 图像处理前投影效果

Fig.20 Projection effect of image before processing



图21 图像处理后的投影效果

Fig.21 Projection effect of image after processing

客观评价投影融合方法有很多,本文根据图像峰值信噪比(peak signal-to-noise ratio, PSNR)从理论上分析融合效果,其计算公式为^[24]:

$$MSE = \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} [I(i,j) - K(i,j)]^2 \quad (14)$$

$$PSNR = 10 \cdot \lg\left(\frac{255^2}{MSE}\right) \quad (15)$$

式中: MSE 为均方误差; $I(i,j)$ 和 $K(i,j)$ 分别为原图像与处理后融合图像的像素灰度值; mn 为总像素值,从实验中随机选取5组投影图像对其进行计算求解,结果如表1所示。

由表1可计算出5组图像峰值信噪比 $PSNR$ 的平均值为33.550 dB,一般认为峰值信噪比超过30 dB图像即具有较好的融合效果,因此投影图像的重叠区域具有良好的边缘融合效果。

表1 峰值信噪比计算结果

Table 1 Calculation results of peak signal-to-noise ratio

组别	I	II	III	IV	V
MSE	57.754	15.573	126.614	8.721	19.651
$PSNR$	30.515	36.207	27.106	38.725	35.197

3 结 论

根据球形屏幕的设计要求和光路理论的分析,确定了采用“上三下三”的分布方式,投影方式采用“交叉”投影。通过求解畸变关系方程和确定图像像素在基准点的坐标,利用该像素点周围的像素灰度值,求出该像素的灰度值,从而对图像进行几何对其校正。

采用边缘衰减算法对融合区域进行处理,从而消除亮场景下重合区域的亮带,通过对设计过滤光路的锯齿形板,改变了各通道的图像边缘的光强,从而降低融合带亮度,实现暗场景下消除亮带的目的,最终使得球幕投影图像整体保持一致,本研究适用于数字图像处理领域。

参考文献

[1] 陈静杰,肖晨,钱文高. A320模拟机遮光板的模块化设计与实现[J]. 控制工程, 2013, 20(5): 818-820, 824.
CHEN J J, XIAO CH, QIAN W G. Building blocks design and implementation of glareshield for A320 simulator [J]. Control Engineering of China, 2013, 20(5): 818-820,824.

[2] 朱维斌,刘明佩,叶树亮. 基于邻域特性分析的小模数齿轮亚像素图像边缘检测[J]. 仪器仪表学报, 2018,39(3): 148-156.
ZHU W B, LIU M P, YE SH L. Sub-pixel image edge detection based on neighborhood characteristic analysis for small modulus gear[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018,39(3): 148-156.

[3] 张沛沛. 多通道大屏幕图像无缝拼接技术研究[J]. 计算机光盘软件与应用, 2014(3): 257-258.
ZHANG P P. Research on seamless splicing technology of multi-channel large screen image [J]. Computer CD Software and Applications, 2014(3): 257-258.

[4] 刘峰,沈同圣,马新星. 交叉双边滤波和视觉权重信息的图像融合[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(4): 1005-1013.
LIU F, SHEN T SH, MA X X. Image fusion via cross

- bilateral filter and visual weight information[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(4): 1005-1013.
- [5] KANG J H, DONG M ZH, ZHANG X J, et al. Multi-focus image fusion combining focus-region-level partition and pulse-coupled neural network[J]. Soft Computing, 2019, 23(13): 4685-4699.
- [6] TIAN J X, LIU G C, LIU J G. Multi-focus image fusion based on edges and focused region extraction[J]. Elsevier Journal, 2018: 611-624. DOI: 10.1016/j.ijleo.2018.06.093.
- [7] 冯玉芳, 殷宏, 卢厚清, 等. 基于改进卷积神经网络的红外与可见光图像融合[J]. 计算机工程, 2019. DOI: 10.19678/j.issn.1000-3428.0055034.
- FENG Y F, YIN H, LU H Q, et al. Infrared and visible image fusion based on improved convolutional neural network [J]. Computer Engineering, 2019. DOI: 10.19678/j.issn.1000-3428.0055034.
- [8] 蔡怀宇, 武晓宇, 卓励然, 等. 结合边缘检测的快速 SIFT 图像拼接方法[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(11): 441-447.
- CAI H Y, WU X Y, ZHUO L R, et al. Fast SIFT image stitching algorithm combining edge detection[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(11): 441-447.
- [9] YU X, LIU S, DONG W, et al. Image retrieval method based on fusion of edge features and RGB color component [J]. International Journal of Multimedia & Ubiquitous Engineering, 2014, 9(10): 243-250.
- [10] 肖朝, 杨红雨, 陈楷民, 等. 大曲率多通道投影显示墙几何校正[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2013(2): 160-164.
- XIAO CH, YANG H Y, CHEN K M, et al. Geometric calibration for large curvature multi-projector tiled display wall [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2013(S2): 160-164.
- [11] 杨勇, 卢航远, 黄淑英, 等. 基于自适应注入模型的遥感图像融合方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2019. DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2019.0372.
- YANG Y, LU H Y, HUANG SH Y, et al. Remote sensing image fusion based on adaptive injection model[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019. DOI: 10.13700/j. bh. 1001-5965.2019.0372.
- [12] 谢晶梅, 宋亚男, 徐荣华, 等. 图像拼接中权重的改进设计研究[J]. 广东大学学报. 2017(6): 49-53, 67.
- XIE J M, SONG Y N, XU R H, et al. An improved design of weight in image mosaic [J]. Journal of Guangdong University of Technology, 2017(6): 49-53, 67.
- [13] 王佳慧, 武静, 张川, 等. 用于 HVS 的拉普拉斯金字塔变换图像融合研究[J]. 电光与控制, 2019(1): 77-80, 91.
- WANG J H, WU J, ZHANG CH, et al. Laplacian pyramid based image fusion for use in HVS [J]. Electronics Optics & Control, 2019(1): 77-80, 91.
- [14] 宣昊, 甄子洋, 王新华, 等. 无人直升机大屏幕多通道视景飞行仿真技术[J]. 电光与控制, 2013, 20(3): 57-60.
- XUAN H, ZHEN Z Y, WANG X H, et al. Big dcreen multi-channel visual flight simulation technique for unmanned helicopters[J]. Electronics Optics & Control, 2013, 20(3): 57-60.
- [15] CHEN D, MING G, LEI S, et al. Image fusion method based on edge feature detection in electrical capacitance tomography [J]. International Journal of Signal Processing, Image Processing & Pattern Recognition, 2014, 7: 267-274.
- [16] ZHAO D X, MA Z, ZHANG D G, et al. A new method of bio-medical image fusion with multi-scale edge [J]. Journal of Information & Computational Science, 2014, 11(16): 5681-5688.
- [17] LI C, ZHAO L, SUN S. An adaptive morphological edge detection algorithm based on image fusion[C]. Image and Signal Processing, 2010: 1072-1076.
- [18] PERUMAL S A, RAJAKUMAR T C, KRISHNAN N. Edge enhancement using pixel based image fusion[C]. Computational Intelligence and Computing Research, 2010: 39-42.
- [19] ZHU S H. Edge detection based on multi-structure elements morphology and image fusion[C]. International Conference on Computing, Control and Industrial Engineering, 2011: 406-409.
- [20] MUDULI P R, PATI U C. A novel technique for wall crack detection using image fusion [C]. International Conference on Computer Communication and Informatics, 2013, 2(8): 1-6.

- [21] 董祉序,孙兴伟,刘伟军,等.基于激光位移传感器的自由曲面精密测量方法[J].仪器仪表学报,2018,39(12):30-38.
DONG Z X, SUN X W, LIU W J, et al. Precision measurement method of free-form curved surfaces based on laser displacement sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(12):30-38.
- [22] 杜永生,黄传波.基于质量度量与颜色校正的多曝光图像融合算法[J].电子测量与仪器学报,2019,33(1):90-98.
DU Y S, HUANG C B. Multi exposure image fusion algorithm based on quality metric coupled with color correction [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(1):90-98.
- [23] FEI XUE, WEI L, YE Z Y, et al. JPEG image tampering localization based on normalized gray level co-occurrence matrix [J]. Multimedia Tools and Applications, 2019, 78(8): 9895-9918.
- [24] 肖祥元,景文博,赵海丽.基于峰值信噪比改进的图

像增强算法[J].长春理工大学学报,2017(4):83-86,92.

XIAO X Y, JING W B, ZHAO H L. An improved image enhancement algorithm based on the peak-signal to noise ratio [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 2017(4): 83-86,92.

作者简介



杨树财(通信作者),1993年于哈尔滨理工大学获得学士学位,2011年于哈尔滨理工大学获得博士学位,现为哈尔滨理工大学教授,主要研究方向为先进切削技术与机械加工技术。

E-mail: yangshucai@hrbust.edu.cn

Yang Shucai (Corresponding author) received his B. Sc. and Ph. D. degrees both from Harbin University of Science and Technology in 1993 and 2011, respectively. He is currently a professor at Harbin University of Science and Technology. His main research interests include advanced cutting technology and machining.