



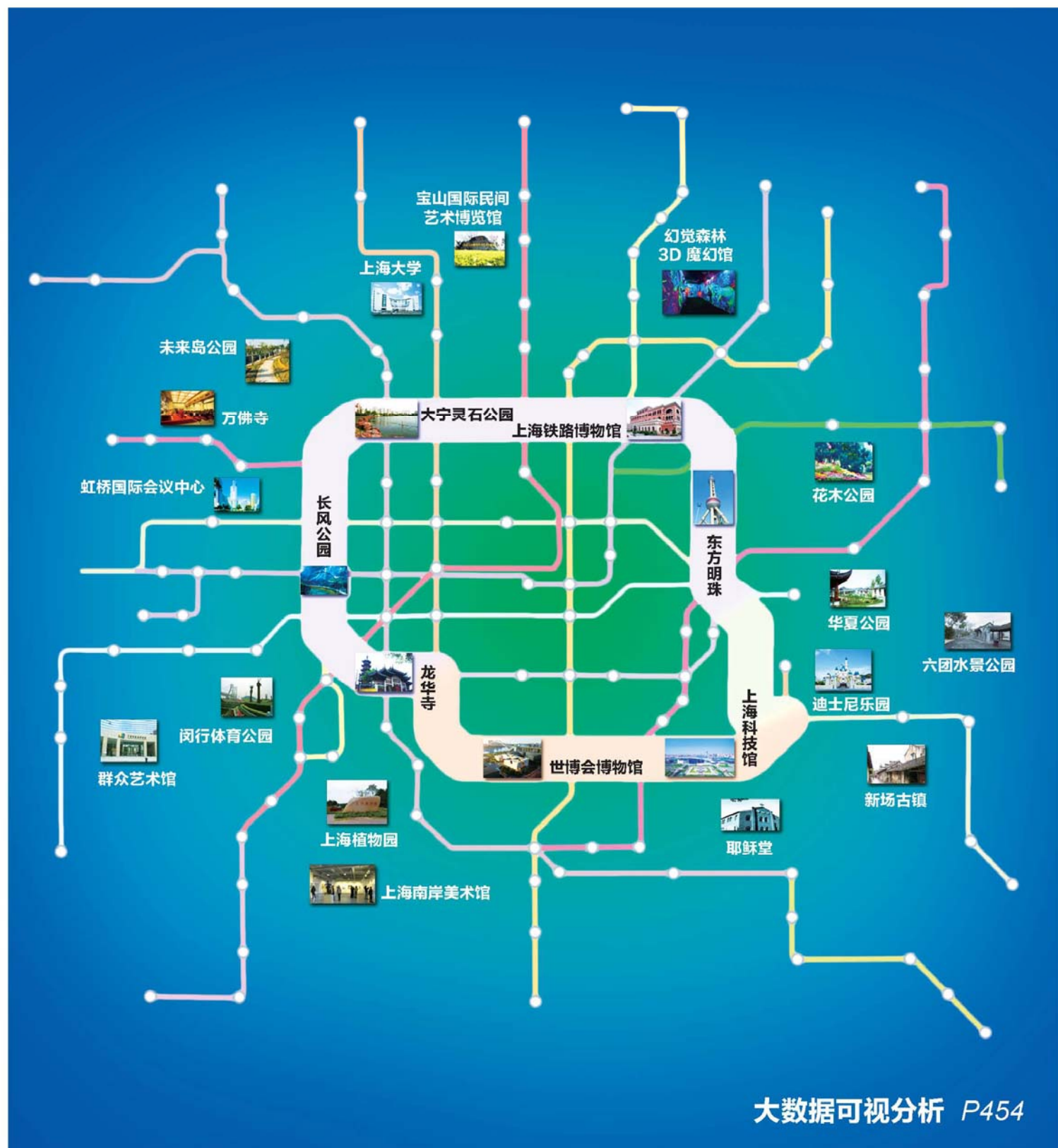
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS

主办: 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

2015
04
VOL.20

ISSN1006-8961
CN11-3758/TB





第20卷第4期（总第228期）

2015年4月16日

中国精品科技期刊
中国国际影响力优秀学术期刊
中国科技核心期刊

版权声明

凡向《中国图象图形学报》投稿，均视为同意在本刊网站及CNKI等全文数据库出版，所刊载论文已获得著作权人的授权。本刊所有图片均为非商业目的使用，所有内容，未经许可，不得转载或以其他方式使用。

Copyright

All rights reserved by Journal of Image and Graphics, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS. The content (including but not limited text, photo, etc) published in this journal is for non-commercial use.

主管单位 中国科学院

主办单位 中国科学院遥感与数字地球研究所

中国图象图形学学会

北京应用物理与计算数学研究所

主 编 李小文

编辑出版《中国图象图形学报》编辑出版委员会

邮政信箱 北京9718信箱

邮 编 100101

电子信箱 jig@radi.ac.cn

电 话 010-64807995

网 址 www.cjig.cn

广告经营许可证 京朝工商广字第0361号

总 发 行 北京报刊发行局

订 购 全国各地邮局

海外发行 中国国际图书贸易集团有限公司

（邮政信箱：北京399信箱 邮编：100048）

印刷装订 北京科信印刷有限公司

Journal of Image and Graphics

Title inscription: Song Jian

Monthly, Started in 1996

Superintended by Chinese Academy of Sciences

Sponsored by Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS

China Society of Image and Graphics

Institute of Applied Physics and Computational Mathematics

Editor-in-Chief LI Xiaowen

Editor, Publisher Editorial and Publishing Board of Journal of Image and Graphics

P.O.Box 9718, Beijing, P.R.China

Zip code 100101

E-mail jig@radi.ac.cn

Telephone 010-64807995

Website www.cjig.cn

Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers and Journals

Domestic All Local Post Offices in China

Overseas China International Book Trading Corporation

(P.O.Box 399, Beijing 100048, P.R.China)

Printed by Beijing Kexin Printing Co., Ltd.

CN 11-3758/TB

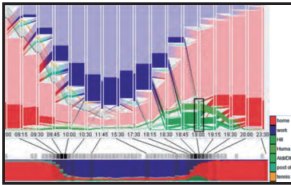
ISSN 1006-8961

CODEN ZTTXFZ

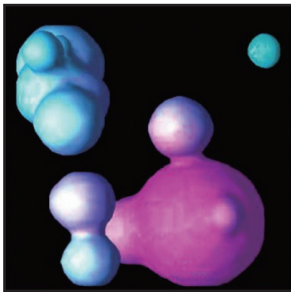
国外发行代号 M1406

国内邮发代号 82-831

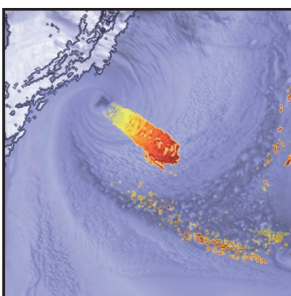
国内定价 50.00元



城市道路交通数据可视分析
综述(第0454页)



可视数据清洗综述
(第0468页)



非对称高斯函数的时变体数
据特征跟踪及可视化
(第0576页)

大数据可视分析

“大数据可视分析”专栏序

梁荣华	0453
城市道路交通数据可视分析综述	
姜晓睿, 田亚, 蒋莉, 梁荣华	0454
可视数据清洗综述	
王铭军, 潘巧明, 刘真, 陈为	0468
基于结构特征的自适应光线投射算法	
罗月童, 张伟, 石放放, 谭文敏	0483
面向浏览器的医学影像可视化系统	
雷辉, 赵颖, 王铭军, 周芳芳	0491

图像处理 and 编码

背投式多投影系统中各向异性问题的研究

王修晖, 王康健, 陆慧娟	0499
可见光与红外图像区域级反馈融合算法	
谷雨, 苟书鑫, 熊文卓, 刘俊, 薛安克	0506
结合天空识别和暗通道原理的图像去雾	
李加元, 胡庆武, 艾明耀, 严俊	0514

图像分析和识别

基于中层时空特征的人体行为识别

王泰青, 王生进	0520
----------------	------

计算机图形学

TBR架构GPU中三角形高效光栅化

符鹤, 谢永芳	0527
---------------	------

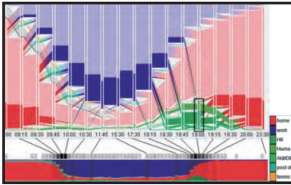
第十届中国计算机图形学大会专栏

V-系统在3D模型数字水印中的应用

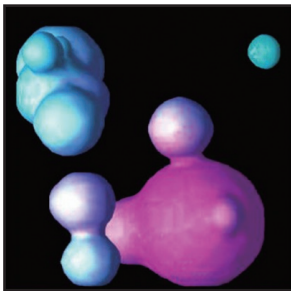
宋瑞霞, 徐燕青, 王小春, 李成华, 王俊, 齐东旭	0533
微距摄影的多聚焦图像拍摄和融合	
赵毅力, 周屹, 徐丹	0544
结合区域配对的室外阴影检测	
艾维丽, 吴志红, 刘艳丽	0551
多尺度粗糙表面的实时绘制方法	
过洁, 潘金贵	0559
体参数化模型离散调和映射生成	
陈龙, 刘玉生, 徐岗	0568
非对称高斯函数的时变体数据特征跟踪及可视化	
白志慧, 周志光, 杨瑞飞, 陶煜波, 林海	0576

CONTENTS

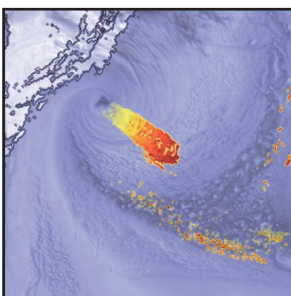
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Visual analytics of urban road transportation data: a survey (P0454)



Survey of visualization data cleaning(P0468)



Time-varying volume visualization and feature tracking based on asymmetric Gaussian function(P0576)

Visual Analytics Towards Big Data

Visual analytics of urban road transportation data: a survey	
Jiang Xiaorui, Tian Ya, Jiang Li, Liang Ronghua	0454
Survey of visualization data cleaning	
Wang Mingjun, Pan Qiaoming, Liu Zhen, Chen Wei	0468
Structure feature based adaptive ray casting algorithm	
Luo Yuetong, Zhang Wei, Shi Fangfang, Tan Wenmin	0483
HTML5-based medical image visualization system	
Lei Hui, Zhao Ying, Wang Mingjun, Zhou Fangfang	0491

Image Processing and Coding

Research on anisotropy problems under rear-projection multi-projector tiled display wall	
Wang Xiuhui, Wang Kangjian, Lu Huijuan	0499
Visible and infrared image region-level feedback fusion algorithm	
Gu Yu, Gou Shuxin, Xiong Wenzhuo, Liu Jun, Xue Anke	0506
Image haze removal based on sky region detection and dark channel prior	
Li Jiayuan, Hu Qingwu, Ai Mingyao, Yan Jun	0514

Image Analysis and Recognition

Human action recognition using mid-level spatial-temporal features	
Wang Taiqing, Wang Shengjin	0520

Computer Graphics

High efficiency triangle raster algorithm in GPU based on TBR architecture	
Fu He, Xie Yongfang	0527

Column of Chinagraph'2014

Application of the V-system to digital watermark of 3D models	
Song Ruixia, Xu Yanqing, Wang Xiaochun, Li Chenghua, Wang Jun, Qi Dongxu	0533
Multi-focus image capture and fusion system for macro photography	
Zhao Yili, Zhou Yi, Xu Dan	0544
Outdoor shadow detection with paired regions	
Ai Weili, Wu Zhihong, Liu Yanli	0551
Real-time rendering of multi-scale rough surfaces	
Guo Jie, Pan Jingui	0559
Generation of volume parameterization model based on discrete harmonic mapping	
Chen Long, Liu Yusheng, Xu Gang	0568
Time-varying volume visualization and feature tracking based on asymmetric Gaussian function	
Bai Zhihui, Zhou Zhiguang, Yang Ruifei, Tao Yubo, Lin Hai	0576

中图法分类号: TP391.41 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2015)04-0499-07

论文引用格式: Wang X H, Wang K J, Lu H J. Research on anisotropy problems under rear-projection multi-projector tiled display wall[J]. Journal of Image and Graphics, 2015, 20(4): 0499-0505. [王修晖, 王康健, 陆慧娟. 背投式多投影系统中各向异性问题的研究[J]. 中国图象图形学报, 2015, 20(4): 0499-0505.][DOI:10.11834/jig.20150405]

背投式多投影系统中各向异性问题的研究

王修晖, 王康健, 陆慧娟

中国计量学院计算机系, 杭州 310018

摘要: 目的 针对背投式多投影系统中存在的各向异性问题, 提出一套行之有效的解决方案。方法 首先, 为了解决以静态观众为主体的多投影系统各向异性问题, 基于反馈机制提出了以特定位置为中心的“最佳观测域”, 并在该区域内实现了真正的视觉无缝画面校正; 然后, 基于视觉人体跟踪技术进一步提出了以特定交互者为中心的“动态最佳观测域”框架, 并结合模糊预测控制思想从人体重心检测、跟踪和投影仪亮度实时补偿等3个方面对该框架内的各个组成模块的关键技术进行了阐述。结果 实验结果显示, 利用交互者运动的时空连续性优化后的动态最佳观测域算法, 具有较好的鲁棒性和实时性。同时, 与其他类似方法相比获得了更好的视觉无缝校正效果, 其中观测距离为1 m、3 m和5 m时, 对应的亮度样本标准差分别为17.11、13.17和9.2。结论 提出的各向异性解决方案, 将实时反馈信号引入校正过程中, 有效提高了输出画面质量。通过实验测试和性能评估, 验证了文中方法的可行性。

关键词: 多投影系统; 背投; 各向异性; 最佳观测点

Research on anisotropy problems under rear-projection multi-projector tiled display wall

Wang Xiuhui, Wang Kangjian, Lu Huijuan

China Jiliang University, Hangzhou 310018, China

Abstract: Objective Large-scale multi-projector display systems offer high resolution, high brightness, a large field of view, and a compelling sense of presence. Thus, these systems have been considered effective choices to tackle the conflict between the increasing demands for super-resolution display and the resolution limitations of single display equipment. However, the display color and brightness of these systems show significant spatial variation, which can be very distracting, there by breaking the illusion of a single display. Furthermore, the use of the rear projection mode has serious an isotropy problems; in particular, the brightness of the projected image varies in accordance with the location of the observer. In this paper, we propose an effective solution to solve the an isotropy problem of rear-projection multi-projector tiled display walls.

Method Our solution includes two levels: static and dynamic optimal observation districts. The static optimal observation district method is focused on situations with a small amount of audience who only moves in a small area. Geometry and color calibrations are executed in accordance with a predetermined observation point by utilizing an information processing model of human attention. Subsequently, observers in the neighborhood of the observation point can see calibrated images with

收稿日期: 2014-10-23; 修回日期: 2014-12-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(61303146, 61100160, 60842009)

第一作者简介: 王修晖(1978—), 男, 副教授, 2007年于浙江大学计算机科学与技术专业博士学位, 主要研究方向为计算机图形学、计算机视觉。E-mail: wangxiuhui@cjlu.edu.cn

Supported by: National Natural Science Foundation of China (61303146, 61100160, 60842009)

highly visual seamless effects. To relax the restrictions of the moving range, we present an observer-centered framework for the dynamic optimal observation district by integrating human tracking techniques and fuzzy predictive control algorithms. In this framework, we first optimize the process of creating projector models and color look-up tables. The center positions of the target observer are then computed via video-based object tracking. Finally, fuzzy predictive control algorithms are used to deal with the positions to create step-shaped coordinates for the human body center, thereby minimizing the need to adjust the brightness compensation and to speed up the screen calibration. **Result** The conventional color calibration methods only work well for certain special positions before the display surface because the color calibration results, which are usually organized as a color look-up table, are obtained off line and the audience's positions are not considered. Extending these methods, we introduce the static optimal observation district method, which allows users to preset an observation point. Furthermore, we allow the user to set the observation point online by capturing the observer's positions in real-time. To test our methods, a screen calibration system for a rear-projection multi-projector tiled display wall is presented on the basis of the dynamic optimal observation district. Experimental results show that calibration methods with a dynamic optimal observation district have good robustness and high calibration efficiency. Therefore, our algorithm generally obtains better calibration results than other similar methods. **Conclusion** Rear-projection multi-projector tiled display walls can be used in several applications. Anisotropy during color calibration has always been a challenge to researchers. This paper introduces the real-time feedback mechanism and proposes a novel dynamic strategy for solving anisotropy problems. The proposed solution can reduce the adverse effects of anisotropy on screen calibration and greatly improve the output image. The experimental results indicate that our solution has a preferable calibration effect even in situations with large-scale movements and has acceptable real-time calculations.

Key words: multi-projector tiled display wall; rear projection; anisotropy; optimal observation point

0 引言

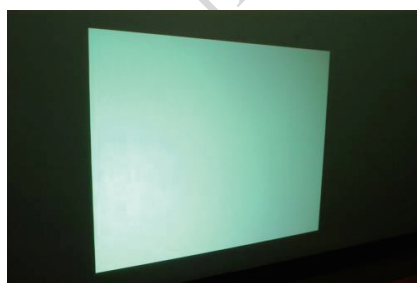
随着商业、娱乐和科学研究等领域对高分辨率展示需求的不断增加,单台显示装置在分辨率和亮度上的局限性日益突出。综合考虑成本和可行性等多方面因素,背投式多投影系统成为一个备受关注的解决方案。背投式多投影系统是由多台投影仪和软件或者硬件图像处理单元构成的大屏幕展示平台,通过对多台普通投影仪输出画面的进行拼接,可以提供高分辨率、高亮度的画面输出。如何确保多投影系统的显示画面在几何和颜色上的完整性,实现自动的画面校正,引起国内外研究者的广泛关注。

多投影系统的画面校正目前的研究成果可以归为两类:几何校正^[1]和颜色校正^[2]。几何校正采用某种特征图案,通过摄像机或者录像机捕获一组特征样本并进行分析和识别,然后求取一个或者一系列的校正矩阵,并通过预扭曲实现显示平面画面的几何对齐。几何校正的精确度主要取决于所采用特征图案的可区分度和投影仪输入输出点映射的计算方法。文献[3]建立了一种基于有理贝塞尔曲线的闭合式投影仪几何模型,然后通过投射高斯色斑阵

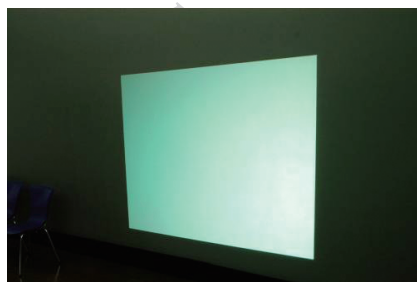
列来获取采样点,并使用 LM (levenberg-marquardt) 最优化算法进行参数估计。文献[4-5]借助于一种鲁棒的条形校正图案设计了一种高精度的平面幕几何校正算法,在此算法基础上,结合立体显示的原理提出了一种立体平面幕几何校正方法。文献[6]采用二次几何校正方法来解决边缘投影仪斜投影造成的部分特征图像落于屏幕外面的问题,减少了传统几何校正中有效投影区域的损失,有效提升了大屏幕显示区域的利用率。文献[7]采用基于二进制编码结构光的离散映射集合方法结合具有鲁棒性的自适应图像处理算法,通过计算对应像素映射关系消除投影图像的几何畸变。颜色校正则是通过直接或者间接的方法得到组成显示平面的每个投影仪的亮度响应曲线,然后计算显示平面的公共亮度响应区间并将所有投影仪亮度映射到公共区间,从而实现显示平面亮度均匀。颜色校正的主要问题是投影仪颜色模型的建立和公共亮度响应区间的求取。文献[3]在基于贝塞尔有理曲线的投影仪几何模型基础上,建立颜色查找表,并通过 GPU 实现非线性的颜色校正。文献[5]提出了一种投影仪广义颜色模型,并借助于改进的遗传算法实现了视觉无缝的颜色校正。文献[8]通过色度域变形来逐个像素地调

整每个投影仪的亮度,实现了视觉无缝的颜色校正。文献[6]提出了一种基于GPU的亮度自适应多模板校正方法,对不同亮度的图像自适应地采用不同的模板进行亮度校正,并通过GPU程序将几何校正和亮度校正合并为一个渲染过程来优化校正效率。文献[7]提出一种基于优化的朗伯特反射模型的颜色补偿算法,构造投影表面的纹理空间对原始投影图像进行预处理和全局亮度补偿来实现颜色校正。

上述方法,通过对投影图像进行几何变换和颜色补偿,在一定程度上实现了多投影显示系统输出画面的完整性。然而,由于投影仪投射亮度和屏幕反射系数的不均衡,造成了投影画面的各向异性问题,使得静态的画面校正难以实现真正的视觉无缝输出,在背投式多投影系统中,各向异性问题尤其突出。如图1所示单台投影仪的情形,从偏离投影仪中轴线的左右两侧观看,屏幕画面高亮区域的位置会发生显著变换。在背投式多投影显示环境中,投影仪光线会在屏幕上产生透射现象而且无法实现观察者同时正对多台投影仪,进一步加剧了各向异性问题的负面影响。这种影响主要体现在两个方面:一是每台投影仪本身的高亮区域会随着观察者在屏幕前的位置不同而发生偏移,从而难以实现真正的亮度均匀化处理;另一方面,给相邻投影仪之间的重叠区域亮度融合带来挑战,重叠区域的融合效果会随着观察者沿着屏幕切向的移动而产生差异。



(a) 从左侧45°查看



(b) 从右侧45°查看

图1 背投式投影中的各向异性问题

Fig. 1 The anisotropy of multi-projector tiled display wall

针对背投式多投影系统画面校正中存在的各向异性问题,提出了一套行之有效的解决方案。首先,基于反馈机制提出了以特定位置为中心的“最佳观测域”,并在该区域内实现了真正的视觉无缝画面校正,缓解了背投式多投影系统画面校正中的各向异性问题;然后结合反馈控制思想,通过单目视觉在2维平面内跟踪观察者,并将观察者在屏幕切向的位移信息作为反馈量输入到画面校正模块,实现了以特定交互者为中心的“动态最佳观测域”,在一定程度上解决了背投式多投影系统画面校正中的各向异性问题。

1 系统框架

对于多投影系统的画面校正问题,传统的方法主要包括两个步骤:1)借助于照相机采集具有特定图案的投影图像,并从中计算投影仪输入图像和投影图像之间的几何变换关系,然后通过预扭曲实现几何校正;2)使用照相机或者光度计等设备捕获大屏幕上投影图像的颜色差异,然后为每个投影仪生成一个逐像素的颜色查找表进行颜色校正。由于每个投影仪只对应一个静态的颜色查找表,在背投式多投影系统等各向异性问题比较严重的环境下,无论颜色查找表的设计如何精巧,都难以实现真正的视觉无缝画面校正效果。如图2所示,通过引入交互者运动反馈信息,本文对传统的多投影系统校正系统进行了改进。其中特征图像集、颜色图像集和实时视频流是来自于照相机或监控摄像头的直接数据。投影仪颜色模型集是在几何校正基础上为每个投影仪建立的一组颜色模型,这些模型将作为颜色校正模块的输入用于生成每个投影仪的颜色查找表集。交互者重心位置是将交互者的3维坐标信息投影到屏幕底边的特定平行线上得到的1维数据。插值颜色查找表则是根据交互者重心位置信息,基于每个投影仪的颜色查找表生成的插值数据集。

针对不同类型的用户需求,改进后的校正方案可以构建两种校正系统:“最佳观测域”系统和“动态最佳观测域”系统。前者用于固定观测位置的应用场合,可以在大屏幕前方指定中心点,生成一个视觉无缝的小观测区域。后者则能够跟踪交互者,并根据交互者的重心位置构造插值颜色查找表,从而生成以交互者为中心的视觉无缝观测区域。

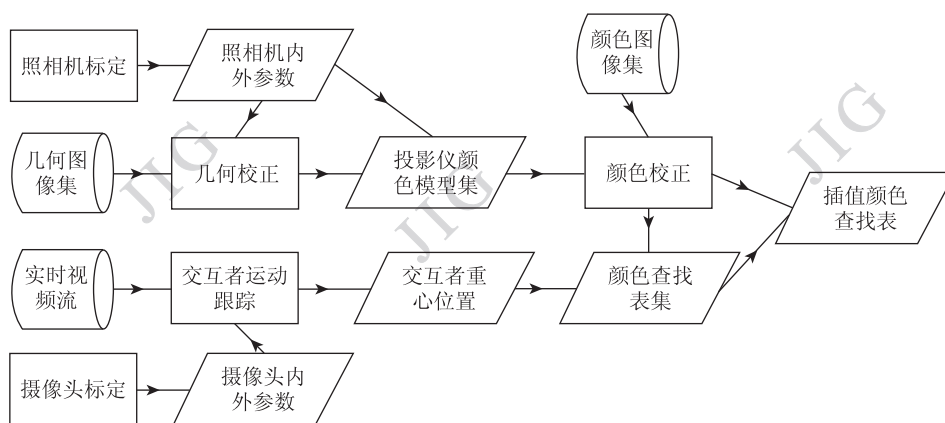


图2 改进后的多投影系统画面校正

Fig. 2 Improve screen calibration for multi-projector tiled display wall

2 最佳观测域

与传统画面校正通常以大屏幕正前方观测效果最佳的做法有所不同,基于最佳观测域的画面校正可以预先指定大屏幕前方的任意一点作为观测中心点,并以该点为中心实现最佳观测域,如图3所示。在这种校正系统中,画面校正前观测位置已经确定,因此无需通过视频检测来计算交互者位置信息,而且每个投影仪颜色校正只需唯一的颜色查找表。

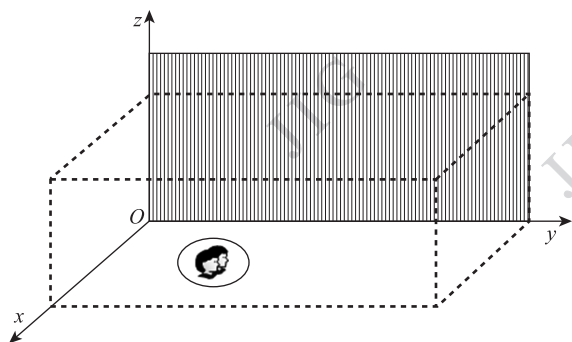


图3 最佳观测域示意图

Fig. 3 Schematic diagram of optimal observation domain

基于最佳观测域的画面校正主要步骤如下:

1) 照相机标定。使用文献[9]中的4步法对用于采集几何和颜色图像数据的照相机进行几何标定,来获得相应的内外参数。

2) 采集几何校正数据。几何校正通常需要借助于某种特征图案进行算法优化,特征图案的选择将直接影响特征点识别的精度和鲁棒性。采用水平和竖直特征条图案^[4],让每台投影仪依次投射两种校正图案并通过标定后的照相机进行采集,然后根

据照相机参数对采集到的几何图像数据进行还原和校正。

3) 几何校正。该步骤的最终目标是获得一个单应矩阵 M_{PD} ,这个矩阵用来预扭曲输入图像以抵消投影仪本身扭曲作用和投影仪摆放不规则因素的影响。为此需要计算从每台投影仪 Buffer 空间到显示平面空间的映射矩阵 $M_{BTW}^{[5]}$,以及从大屏幕原始输出到期望的规则输出的变换矩阵 M_{WTE} 。

4) 建立投影仪的参数化广义颜色模型。综合考虑投影仪本身特性、投影幕布反射属性以及投影距离和投影角度等多种因素建立每台投影仪的参数化广义颜色模型,并通过校正后的照相机在给定的观测位置采集特定颜色图像进行参数估计。由于普通照相机无法直接获取投影画面的真实颜色信息,因此通过在相同位置采用不同曝光参数拍摄多幅图像来合成 HDR (high-dynamic range) 图像^[10],间接地得到对应一系列纯色图像输入的投影信息来确定广义颜色模型的参数。

5) 颜色校正。通过投射黑屏(输入图像所有像素为纯黑色)和白屏图像(输入图像所有像素为纯白色),计算所有投影仪的公共亮度响应区间,并根据每台投影仪的广义颜色模型生成对应的颜色查找表。传统的颜色校正方法,通过识别黑屏投影图像中最亮像素点的亮度值 L_{min} 和白屏投影图像中最暗像素点的亮度值 L_{max} ,构造严格的公共亮度响应区间 $[L_{min}, L_{max}]$ 。借鉴文献[5]的方法,通过统计剔除孤立的亮度畸变点,生成视觉无缝的公共亮度响应区间,拓展了多投影系统校正结果的灰度级范围。

6) 校正数据的实时应用。通过将几何校正矩

阵和颜色查找表数据插入到绘制流水线,进行预扭曲和颜色补偿,实时地调整多投影系统的输出,实现视觉无缝的画面校正。

3 动态最佳观测域

为了解决最佳观测域的局限性,基于视觉人体跟踪技术进一步提出了以特定交互者为中心的动态最佳观测域框架,如图4所示。在静态最佳观测域的基础上,重点对颜色校正中投影仪模型的建立和实时颜色校正中颜色查找表生成方法进行了优化,并引入了交互者重心位置作为反馈信号实现颜色校正的动态调整。

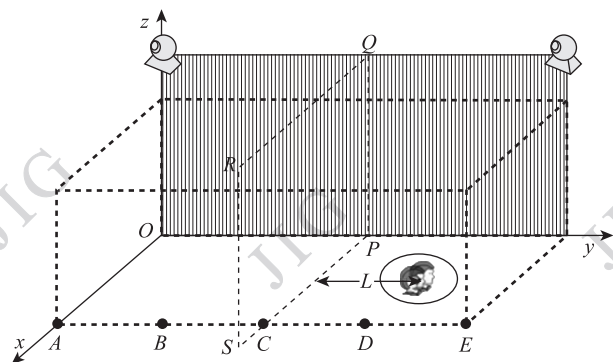


图4 动态最佳观测域示意图

Fig. 4 Schematic diagram of dynamic optimal observation domain

下面结合模糊预测控制思想从人体重心检测与跟踪和投影仪亮度实时补偿两个方面对该框架内所涉及的关键技术进行阐述。

3.1 交互者重心检测与跟踪

为了能够实时稳定地获得交互者的重心坐标,利用交互者运动的时空连续性和模糊预测理论来生成步进式的人体重心坐标,对动态亮度补偿策略进行优化来提升画面校正的效率。交互者重心检测进程运行在服务器端,生成的步进式人体重心坐标通过局域网同步传输到每台绘制客户端,具体过程如下:

1) 摄像头的几何标定。通过两个摄像头依次采集一组具有深度信息的黑白格定标板以及大屏幕边缘的若干标识点的图像样本,然后提取采样照片中的黑白格角点、标识点等信息来计算摄像头的内外参数,并以大屏幕左下角为原点来建立的世界坐

标系,如图4所示。

2) 交互者跟踪。使用两个定标后的摄像头对当前交互者进行跟踪,并使用基于统计模型和活动轮廓^[11]的运动目标检测算法分别从两幅同步图像中提取交互者轮廓。在此基础上,计算交互者的人体包围盒,并以其中心点构造交互者重心的2维坐标向量 $\{P_i | i=1,2\}$ 。

3) 重心坐标的3维重建。根据步骤1)中得到的摄像头内外参数生成对应于两个摄像头的内参矩阵 $\{K_i | i=1,2\}$,旋转矩阵 $\{R_i | i=1,2\}$,以及平移向量 $\{T_i | i=1,2\}$ 。然后对步骤2)中生成的交互者重心2维坐标进行3维重建来获得交互者重心的3维坐标向量 $\{P'_i | i=1,2\}$,即

$$P'_i = M_i^{-1} P_i \quad (1)$$

式中, M_i 是第*i*个摄像头的综合变换矩阵,定义为

$$M_i = K[R|T] \quad (2)$$

4) 检测结果的阶跃化处理。因为动态最佳观测域求解中需要输入交互者在*x*轴正方向上的偏移量,因此本文算法将两个摄像头求取的交互者重心坐标分别投影到虚拟交互体底面中与屏幕平行的边线AE上得到偏移量 $\{L_i | i=1,2\}$ (交互者到屏幕中心垂面PQRS的距离),如图4所示,并取其平均值作为最终的偏移量 $\bar{L}$ 。另一方面,为了进一步简化问题以提高动态画面校正的效率,根据预设的步长*S*,对 $\bar{L}$ 进行阶跃化处理,生成步进式的人体重心坐标。

3.2 投影仪亮度实时补偿

在对多投影系统进行实时画面校正过程中,首先采用4步法^[9]对采集样本用的照相机进行标定,来获取照相机的内外参数。在此基础上,采用类似于文献[4]中的几何校正方法计算从每台投影仪Buffer空间到显示平面画面空间的映射矩阵 M_{BTW} 和用来实现大屏幕几何对齐的预扭曲矩阵 M_{PD} 。

为了实现不同观察点的最佳观测效果,将图4中虚线所示的虚拟交互体沿着*y*轴线方向均匀地分成 η 份(η 为预设校正精度因子,默认取值为4)。在每一个分割点依次采用与文献[5]中的方法建立并确定每台投影仪的广义颜色模型集 $\{f_j | j \in [1, \eta]\}$ 。每台投影仪的颜色模型是针对RGB 3个通道分别建立的,以红色通道为例,设 $(R_i, f(R_i))$, $i \in [0, p+q]$ 是输入为 $(R_i, 0, 0)$ 时的一

组互异的采样数据,则当前投影仪的广义颜色模型 $f(R_i)$ 定义为

$$C_{p,q(R)} = \frac{M_p(R)}{N_q(R)} = \frac{a_0 + a_1 R + \cdots + a_p R^p}{b_0 + b_1 R + \cdots + b_q R^q} \quad (3)$$

满足插值条件

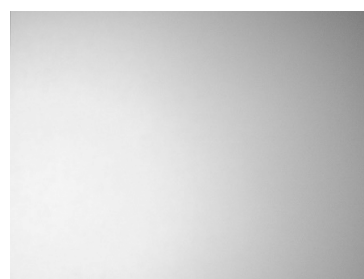
$$C_{p,q(R_i)} = \frac{M_p(R_i)}{N_q(R_i)} = f(R_i) \quad (4)$$

最后,根据每个分割点的 RGB 广义颜色模型分别计算对应 3 个颜色通道的颜色补偿因子,并合成为逐像素校正模板集 $\{T_i | i \in [1, \eta]\}$ 。在投影仪亮度实时补偿过程中,对应于每个投影仪的绘制引擎客户端,根据交互者当前位置的步进式重心坐标,使用相邻的两个逐像素校正模板进行双线性插值生成最终的插值模板。

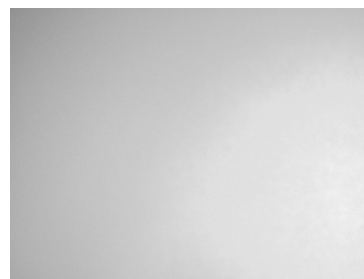
4 实验结果与分析

为了验证本文解决方案的有效性,设计一套带反馈的单投影仪背投系统进行实验测试。投影仪采用爱普生 LCD 投影仪(型号:CH-TW5200C;亮度:2 000 流明;对比度:15 000;分辨率:1 024 × 768);幕布采用 72 寸 4:3 高清背投软幕;数码相机采用尼康 P7800 (1 219 万像素);摄像头采用 HISUNG 高清网络摄像头。考虑到静态最佳观测域方案本质上是动态最佳观测域方案的一个特例,这里只对动态最佳观测域进行了测试。单台投影仪投射白色画面的亮度比较如图 5 和图 6 所示(图中亮度数据获取方法:用数码相机拍摄投影画面,并将其中的有效投影区域转换为 1 024 × 768 的像素矩阵 M ;然后取矩阵 M 上的 32 × 32 像素块的平均亮度值作为图中的一个数据)。

从图 5 可以看出,在背投系统环境下,传统画面校正方法获得的显示效果会随着观察者在屏幕前的位置不同而发生显著变化。从屏幕中心偏左的位置进行观察时,屏幕右侧的画面校正效果明显变差;反之,从屏幕中心偏右的位置进行观察,左半部分画面的校正效果也出现亮度不均匀的现象。图 6 所示为本文算法的屏幕显示结果,由于采用了视频跟踪技术提供反馈信号并进行动态校正策略调整,画面校正效果不随观察者位置移动而发生变化,有效地抑制了各向异性问题。另外,由于本文算法是在传统多投影系统画面校正基础上实施的,是借助于反馈控制对传统方法的改进,不需要特制的或者昂贵的



(a) 左前方45°亮度分布



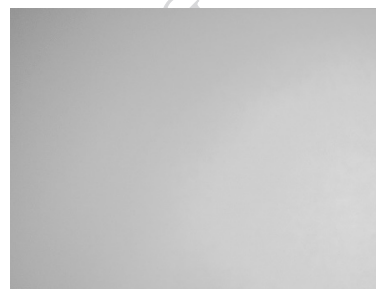
(b) 右前方45°亮度分布

图 5 各向异性处理前亮度分布

Fig. 5 The brightness distribution before anisotropy processing



(a) 左前方观察效果



(b) 右前方观察效果

图 6 各向异性处理后亮度分布

Fig. 6 The brightness distribution after anisotropy processing

设备进行辅助,具有较强的可操作性和实用性。

表 1 给出了 30 个采样观察点屏幕亮度统计数据。采样数据的获取方法为:在显示平面前方垂直距离为 1 m、2 m、3 m、4 m 和 5 m 处分别划 1 条平行于显示平面的线段(如图 4 中的 AE);然后将每条线段等分为 5 份,获得 6 个观察点(如图 4 中的观察点 $A \sim E$),在每个观察点拍摄一幅白屏投影照片;最后

根据几何校正矩阵将每张白屏照片中的有效投影区域提取出来并映射到 $1\,027 \times 768$ 的标准尺寸,从而获得 $1\,024 \times 768$ 个像素点的亮度数据(亮度数据取值范围为 $0 \sim 255$)。可以看出,随着观察点与显示平面的距离增大,观察点亮度的样本极差和样本标准差更小,屏幕的亮度波动更小,即各向异性抑制效果更好。

表1 各向异性处理后的亮度分布情况统计

Table 1 The brightness distribution after anisotropy processing

观察点与屏幕距离/m	样本均值	样本极差	样本标准差
1	180.21	25	17.11
2	174.03	22	14.54
3	170.40	17	13.17
4	165.33	15	10.89
5	161.75	14	9.20

5 结 论

针对背投式多投影系统画面校正中广泛存在的各向异性问题,提出了一种以静态观众为主体的“最佳观测域”解决方案,在事先指定的小区域内实现了高质量的视觉无缝画面校正。在此基础上,利用视觉人体跟踪技术进一步提出了以特定交互者为中心的“动态最佳观测域”框架,并结合模糊预测控制思想从人体重心检测、跟踪和投影仪亮度实时补偿等3个方面对框架内的各个组成模块进行了深入讨论。实验结果表明,本文算法能够有效地解决背投式多投影系统画面校正中的各向异性问题,实现实时的视觉无缝画面输出。然而,本文重点探讨了背投式平面幕多投影系统中少量观众情况下的各向异性问题,对于大量观众和非平面幕多投影环境下的各向异性问题,将是今后的研究内容之一。

参考文献 (References)

- [1] Brown M S, Majumder A, Yang R G. Camera-based calibration techniques for seamless multiprojector displays [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2005, 11(2): 193-206. [DOI: 10.1109/TVCG.2005.27]
- [2] Majumder A, Stevens R. Color nonuniformity in projection-based

displays: analysis and solutions [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2004, 10(2): 177-188. [DOI: 10.1109/TVCG.2004.1260769]

- [3] Bhasker E S, Majumder A. Geometric modeling and calibration of planar multi-projector displays using rational bezier patches [C]// Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Minneapolis, MN: IEEE Computer Society Press, 2007: 1-8. [DOI: 10.1109/CVPR.2007.383466]
- [4] Wang X H, Yang H B, Lin H. Geometry calibration for multi-projector tiled display wall [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2008, 20(6): 707-712. [王修晖, 杨海波, 林海. 多投影显示墙的几何校正[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2008, 20(6): 707-712.]
- [5] Wang X H, Hua W, Bao H J. Screen calibration techniques for multi-projector tiled display wall [J]. Journal of Software, 2007, 18(11): 2955-2964. [王修晖, 华伟, 鲍虎军. 面向多投影系统的画面校正技术[J]. 软件学报, 2007, 18(11): 2955-2964.] [DOI: 10.1360/jos182955]
- [6] Zhou Y X, Qin K H, Luo J L. GPU-based geometric and photometric corrections for multi-projector autostereoscopic display [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2011, 23(4): 561-570. [周艳霞, 秦开怀, 罗建利. 多投影机自由立体显示的 GPU 几何及亮度校正技术[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2011, 23(4): 561-570.]
- [7] Zhu B, Xie L J, Yang T J, et al. An adaptive calibration algorithm for projected images in daily environment [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2012, 24(7): 941-948. [朱博, 解利军, 杨廷俊, 等. 自适应复杂环境的投影图像校正算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2012, 24(7): 941-948.]
- [8] Sajadi B, Lazarov M, Majumder A, et al. Color seamlessness in multi-projector displays using constrained gamut morphing [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2009, 15(6): 1317-1326. [DOI: 10.1109/TVCG.2009.124]
- [9] Heikkilä J, Silven O. A four-step camera calibration procedure with implicit image correction [C] // Proceeding of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. New York: IEEE Computer Society Press, 1997: 1106-1112. [DOI: 10.1109/CVPR.1997.609468]
- [10] Nayar S K, Mitsunaga T. High dynamic range imaging: spatially varying pixel exposures [C] // Proceeding of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Hilton Head Island, SC: IEEE Computer Society Press, 2000: 472-479. [DOI: CVPR.2000.855857]
- [11] Zhu C J, Zhu S A. Motion detection and object tracking based on statistical model and active contour [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2006, 40(2): 249-253. [王长军, 朱善安. 基于统计模型和活动轮廓的运动目标检测与跟踪[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2006, 40(2): 249-253.]