

面向多投影显示墙的画面校正技术*

王修晖^{1,2}, 华 炜²⁺, 林 海², 鲍虎军²

¹(中国计量学院 信息工程学院, 浙江 杭州 310018)

²(浙江大学 CAD&CG国家重点实验室, 浙江 杭州 310058)

Screen Calibration Techniques for Multi-Projector Tiled Display Wall

WANG Xiu-Hui^{1,2}, HUA Wei²⁺, LIN Hai², BAO Hu-Jun²

¹(College of Information Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

²(State Key Laboratory of CAD & CG, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

+ Corresponding author: E-mail: huawei@cad.zju.edu.cn

Wang XH, Hua W, Lin H, Bao HJ. Screen calibration techniques for multi-projector tiled display wall. *Journal of Software*, 2007,18(11):2955–2964. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/2955.htm>

Abstract: Multi-Projector tiled display wall is thought to be an effective technique to tackle the conflict between the increasing demands for super-resolution display and the resolution limitations of a single display equipment, but currently there lack of normal forms and normalized methods to support screen calibration with a high precision and high reliability. This paper tries to solve this problem with a new color calibration scheme. The main problems in screen calibration and the existing solutions are introduced first. Then the screen calibration process and geometry calibration methods are listed. After that, evaluation criterions for screen calibration are discussed, and a generalized color model for projectors color calibration and a visual seamlessness algorithm are presented in detail. Only employing a digital camera, the new scheme can build tiled display walls with high-precision visual seamlessness, which results in higher construction efficiency and lower maintenance cost. The methods have been verified and applied in a variety of tiled display wall, and have shown great theoretical and practical significance for building and maintain tiled display walls.

Key words: multi-projector tiled display wall; screen calibration; generalized color model; visual seamlessness; genetic algorithm; simulated annealing

摘 要: 多投影显示墙是缓解对超分辨率显示屏幕不断增长的需求与单台显示设备分辨率有限性之间矛盾的有效手段,但目前还缺乏规范化的模式和方法以支持高精度、高可靠性的画面校正。提出一种颜色校正方案以解决上述问题。首先介绍多投影显示墙画面校正中存在的主要问题和现有的解决方法;在此基础上,给出了多投影显示墙的画面校正流程和几何校正方法;然后讨论了多投影显示墙画面校正结果的评价标准,提出了投影仪的广义颜色模型和基于搜索技术的视觉无缝方法。该方案使用数码相机实现了高精度的视觉无缝画面校正,从而提高了构造多投影显示墙的效率并降低了维护成本。校正结果在多种类型的投影墙系统中得到验证和应用,对指导多投影显示墙的

* Supported by the National Basic Research Program of China under Grant No.2002CB312100 (国家重点基础研究发展计划(973)); the National High-Tech Research and Development Plan of China under Grant No.2006AA01Z325 (国家高技术研究发展计划(863))

Received 2006-09-11; Accepted 2007-02-05

搭建和维护具有较高的理论与实践价值.

关键词: 多投影显示墙;画面校正;广义颜色模型;视觉无缝;遗传算法;模拟退火

中图法分类号: TP391 文献标识码: A

多投影显示墙被认为是缓解对超高分辨率显示屏幕不断增长的需求与单台显示设备分辨率有限性之间矛盾的重要手段.多投影显示墙是由多台投影机通过拼接而成的大规模显示设备,具有成本低和可扩展性强等优势.然而,要真正使其实用化,必须解决安装维护和画面拼接两方面的技术问题.最初的多投影显示墙是借助于精密的光学设备,通过手工调整投影机位置实现相邻投影机画面拼接的,这种显示墙不方便维护,而且无法消除投影机之间的颜色差异.因此,通过软件实现的自动画面校正成为备受关注的研究热点.

多投影显示墙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墙画面的几何对齐.几何校正的精确度决定于所采用特征图案的可区分度和识别算法,代表性的方法见文献[3,4].这两种方法分别采用录像机和摄像机对每个投影机投射的水平和垂直直线进行采样,并通过对大量对应点的最小二乘法拟合处理来实现亚像素的几何对齐.颜色校正则是通过直接或者间接的方法得到组成显示墙的每个投影机的亮度响应曲线,然后计算显示墙的公共亮度响应区间并将所有投影机亮度映射到公共区间,从而实现显示墙亮度均匀.颜色校正的主要问题是投影机颜色模型的建立和公共亮度响应区间的求取,代表性的方法见文献[5-7].其中,文献[5]的方法依赖于昂贵的光学设备(分光辐射计)来检测显示墙上的绝对亮度值;文献[6]的方法虽然仅需要使用数码相机进行颜色采样,但对样本的需求量巨大,严重降低了其实用性;而文献[7]的方法采用的优化方案则在很大程度上依赖于操作者的经验来选择初值和迭代结果.

综合而言,多投影显示墙的画面校正,尤其是颜色校正方面,尚缺乏切实可行的模式和方法.本文在借鉴文献[8]中 HDR(high dynamic range)技术的基础上,提出了一种广义颜色模型,并融合模拟退火和遗传算法思想解决了公共亮度区间的求取问题,提高了颜色校正的可行性和画面质量.

1 多投影显示墙的画面校正概述

画面校正技术是多投影显示墙安装和维护必须解决的首要问题.多投影显示墙的画面校正包括两方面的内容:几何校正和颜色校正.几何校正通常需要借助于某种图像采集设备(如数码相机、摄像头等)构造反馈支路,以便获取组成显示墙的不同投影机之间的相对位置关系,并据此估计预补偿矩阵,从而实现不同投影机所投射画面之间的匹配与对齐.颜色校正的目标是消除投影机内部和投影机之间的亮度差异,并实现相邻投影画面之间的平滑过渡.投影机颜色模型的建立和公共亮度响应区间的确定是颜色校正要解决的关键技术问题.

图 1 给出了多投影显示墙的画面校正流程,阴影区内的部分用来实现颜色校正.下面给出面向多投影显示墙画面校正技术的基本概念和思想.

定义 1(BTW(buffer to wall)矩阵). 从每个投影机Buffer空间 Ω_B 到显示墙空间 Ω_W 的单应矩阵,定义为该投影机的BTW矩阵,记作 M_{BTW} .对应每个投影机,可以有一个或者分别对应不同投影子区域的一组BTW矩阵,后者通过对投影机区域的细分,可以更好地补偿投影机几何扭曲的非线性分量.

定义 2(补偿矩阵). 补偿矩阵是可以直接插入到绘制流水线终端来补偿投影机的几何扭曲,实现几何校正的矩阵,记作 M_G .通常由用于实现几何对齐的矩阵与BTW矩阵组合生成.

定义 3(广义颜色模型). 除了投影机本身固有的特性之外,还考虑投影机与投影屏幕之间的距离、投影角度以及屏幕的光学特性等因素建立的投影机颜色模型,定义为投影机的广义颜色模型(generalized color model,记作 GCM).

定义 4(颜色查找表). 颜色查找表(color lookup table,记作 CLT)是指投影机输入与输出之间的映射关系表,本文特指根据投影机 GCM 的有理逼近得到的输入、输出对应表.

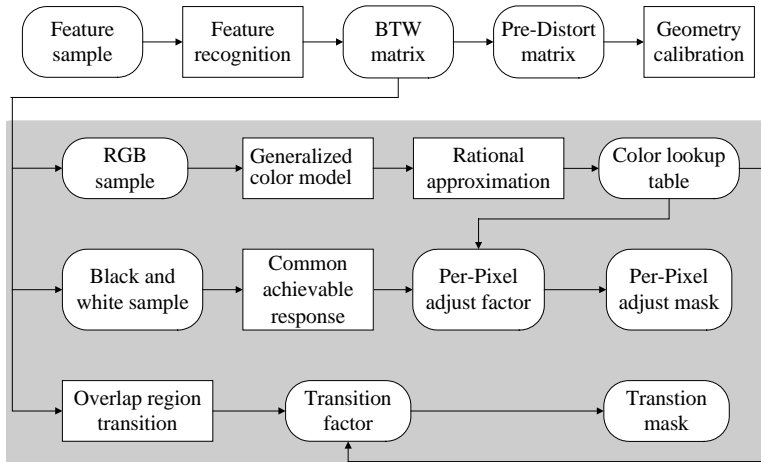


Fig.1 Screen calibration flow for multi-projector tiled display wall

图 1 多投影显示墙的画面校正流程

定义 5(公共亮度响应区间). 将以全部投影机都能达到的最小亮度为下限、全部投影机都能达到的最大亮度为上限的区间,定义为多投影显示墙的公共亮度响应(common achievable response,记作 CAR)区间.

多投影显示墙的画面校正共使用了 3 个样本集,如图 1 所示.其中,特征图案样本集是指当每个投影机依次投射具有特定图案的画面时,采集的显示墙图像信息;RGB 纯色样本集是指当投影机 RGB 的 3 个颜色通道的输入值在[0,255]之间变化时,采集的显示墙图像信息;“黑白屏”样本集包含了所有投影机输入均为 0 时的显示墙“黑屏”信息和投影机一个颜色通道输入为 255,另外两个颜色通道输入为 0 时的单通道“白屏”信息.

2 几何校正

几何校正的目标是保证多投影显示墙画面的几何完整性.因此,我们通过数码相机的反馈图像来预测每个投影机产生的扭曲信息,并生成一个或多个Homography矩阵^[1]补偿投影扭曲带来的几何失真.在进行几何校正之前,需要采集所有投影机依次投射某种特征图案时多投影显示墙的画面信息.特征图案的选择直接影响到校正矩阵的精度,本文采用文献[4]所描述的特征线图案来获取对应点,如图 2 所示.

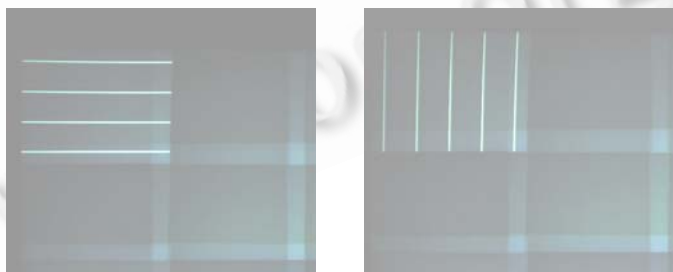


Fig.2 Features for geometry calibration

图 2 几何校正图案

几何校正的具体步骤描述如下:

- (1) 特征图案样本集的预处理.分析样本集中特征线的分布状况,并通过水平方向和竖直方向的逐行扫描检测特征条的边缘点,分别生成对应每台投影机 I 的边缘点集 $\{P_{HI}\}$ 和 $\{P_{VI}\}$.
- (2) 借助霍夫变换对 $\{P_{HI}\}$ 和 $\{P_{VI}\}$ 进行直线拟合,得到特征线集 $\{L_{HI}\}$ 和 $\{L_{VI}\}$.
- (3) 求取 $\{L_{HI}\}$ 和 $\{L_{VI}\}$ 的交点集 $\{P_I\}$.

(4) 采用最小二乘法,根据 $\{P_i\}$ 中点与 Buffer 中像素点的对应关系,求取对应每台投影仪 I 的 BTW 矩阵集 $\{M_{BTW}\}$.

(5) 求解将多投影显示墙从照片画面变换到期望画面时,每个投影仪需要应用的修正矩阵集 $\{M_R\}$.

(6) 计算可以直接插入到绘制流水线的补偿矩阵集 $\{M_G\}$.要在绘制流水线中应用修正矩阵 M_R ,需要将 M_R 变换到投影之前,即转换为对 Buffer 空间向量的作用.假设 Buffer 空间中任意点的齐次坐标为 X ,期望点的齐次坐标为 X' ,则

$$X' = X \cdot (M_p \cdot M_R \cdot M_p^{-1}) \cdot (M_p) = X \cdot (M_p) \cdot M_R \quad (1)$$

其中, (M_p) 表示由投影仪自身投影变换的等价矩阵, $M_G = M_p \cdot M_R \cdot M_p^{-1}$ 为补偿矩阵.由等式(1)可以看出,在 Buffer 内容被投影之前,根据 M_G 预先对 Buffer 空间中的原始图像进行矩阵变换,即可补偿投影仪带来的图像扭曲,并实现显示墙投影区域的矩形化,如图 3 所示.

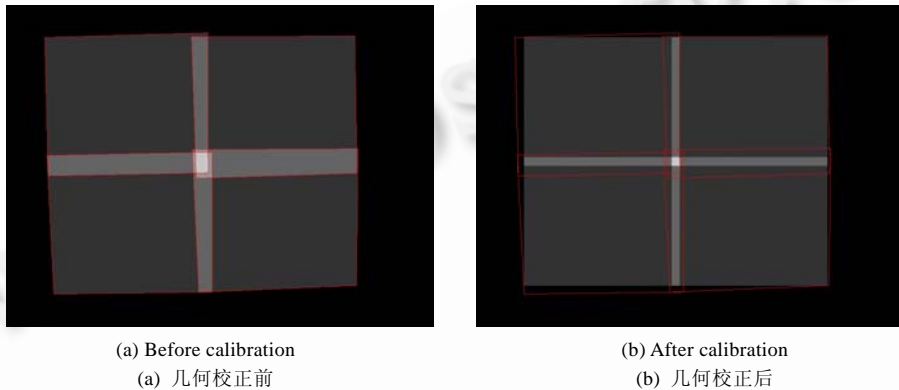


Fig.3 Schematic of geometry calibration

图 3 几何校正示意图

在上述步骤(1)中,当有部分投影仪亮度较低或者由于投射方向与显示墙的法向偏差较大而发生严重衍射时,会造成部分特征线无法识别.可以通过提高特征线宽度加以解决,但是特征线尺寸过大会显著降低校正矩阵的精度.在步骤(4)中,如果将每个投影仪的投影区域进行细化,并分别对每个子区域求取一个 BTW 矩阵,则可以更好地补偿投影仪镜头带来的非线性扭曲,从而提高几何校正的精度.

3 颜色校正

3.1 评价标准

多投影显示墙的颜色校正可以通过畸变点孤立度和全局亮度偏差两个指标进行评价.其中:畸变点孤立度决定校正后多投影显示墙画面视觉亮度的均匀程度;而全局亮度偏差则表征了校正后画面绝对亮度的均匀程度.

定义 6(视觉无缝显示墙). 根据人眼视觉特性,剔除多投影显示墙的黑屏样本数据中的严重偏亮点和白屏数据中的严重偏暗点,再求取公共亮度响应区间,从而生成的无缝显示墙,定义为视觉无缝显示墙.

定义 7(畸变点孤立度). 生成视觉无缝显示墙时被剔除的畸变点 $P(x,y)$ 在屏幕上的分散程度定义为该畸变点的孤立度,记作 $I_E(x,y)$.

$$I_E(x,y) = L(x,y) - \frac{1}{W \times H \times m} \times \sum_{i=1}^m \left[L_i \times \sum_{j=1}^n (D_{i,j} \times \sigma_j) \right] \quad (2)$$

其中, $L(x,y)$ 为畸变点处的亮度值, W 和 H 为屏幕分辨率, m 为所有可能的亮度值个数, n 为投影仪个数, L_i 为第 i 种可能亮度值, $D_{i,j}$ 为亮度值 L_i 在屏幕 j 上出现的次数, σ_j 为屏幕 j 的样本方差.

定义 8(全局亮度偏差). 视觉无缝显示墙上所有子投影区域的平均样本方差,定义为校正后多投影显示墙的全局亮度偏差,记作 E_G .

$$E_G = \frac{1}{n} \times \sum_j^n \sigma_j \tag{3}$$

其中, n 为投影仪个数, σ_j 为每个投影仪的样本方差.

3.2 广义颜色模型

在多投影显示墙环境下,除了投影仪本身的固有特性之外,屏幕画面的颜色还取决于投影距离、投影角度和屏幕的光学特性等因素.实验结果表明,当投影仪的 RGB 输入超过某一定值 τ 之后,投影墙上相关投影区域的亮度和颜色趋于饱和;同时,当投影仪的 RGB 输入在低于某一定值 ξ 的范围内变化时,对投影墙的输出亮度和颜色信息影响极小.综合考虑我们实验采用的 LCD 投影仪的投影原理和上述实验规律,提出了有理分式函数形式的广义颜色模型.广义颜色模型是针对 RGB 的 3 个通道分别给出的,不失一般性,这里以 R 通道为例.

设 $(R_i, f(R_i)), i=0, 1, \dots, p+q$ 是当给定投影仪的 RGB 输入值为 $(R_i, 0, 0)$ 时的一系列采样点,其中, $R_i(i=0, 1, \dots, p+q)$ 互异, $f(R_i)(i=0, 1, \dots, p+q)$ 为相应的亮度输出.定义该投影仪的广义颜色模型如下:

$$C_{p,q}(R) = \frac{M_p(R)}{N_q(R)} = \frac{a_0 + a_1R + \dots + a_pR^p}{b_0 + b_1R + \dots + b_qR^q} \tag{4}$$

满足插值条件:

$$C_{p,q}(R_i) = \frac{M_p(R_i)}{N_q(R_i)} = f(R_i) \tag{5}$$

并称 R_0, R_1, \dots, R_{p+q} 为插值节点, $C_{p,q}(R)$ 为插值函数, $f(R)$ 为期望广义颜色模型.

3.3 最优有理逼近

有理插值问题(4)和问题(5)的解不恒存在^[9],但是容易证明,当多投影显示墙的输入 R_i 和亮度输出 $f(R_i)$ 均在区间 $[0, 255]$ 中取值时,存在最优逼近有理分式 $\varpi_{p,q}(R)$ 满足插值条件(5).定义有理插值的误差函数 $E(R)$ 为

$$E(R) = \max_{0 \leq R \leq 255} |f(R) - C_{p,q}(R)| \tag{6}$$

期望广义颜色模型 $f(R)$ 的最优有理逼近问题,就是寻求多项式 $M_p(R)$ 和 $N_p(R)$ 的特定系数集 $A_k = \{a_i | i=0, 1, \dots, p\}$ 和 $B_k = \{b_i | i=0, 1, \dots, p\}$,使得

$$E_{A_k, B_k}(R) = \min(E(R) \cdot W(R)) \tag{7}$$

其中, $W(R)$ 为权重函数,对位于区间 $[0, 255]$ 中不同位置的采样点给予不同的权重.实验结果表明,当采样点接近区间端点时,显示墙输出颜色的畸变程度变化相对较大,因此权重因子较大;另一方面,对于区间中部的输入值,输出畸变程度相对较小,因而使用较小的权因子.

算法 1. 期望广义颜色模型 $f(R)$ 的最优有理逼近算法.

输入:当投影仪的 RGB 输入在 $[0, 255]$ 之间变化时的输出亮度样本集.

输出:期望广义颜色模型 $f(R)$ 的最优逼近有理分式 $\varpi_{p,q}(R)$.

- (1) 预处理输入的亮度样本集,随机获取初始化系数集 $A(t)$ 和 $B(t)$.
- (2) 由等式(6)构造当前系数集 $A(t)$ 和 $B(t)$ 对应的误差函数 $E(R)$,并计算当 R 在区间 $[0, 255]$ 中取值时的最大误差 E_m ,若 E_m 小于预设阈值 E_Δ ,则转步骤(5).
- (3) 根据式(7)计算加权逼近误差 $E_{A_k, B_k}(R)$,若 $E_{A_k, B_k}(R)$ 满足期望误差,则转步骤(5).
- (4) 根据 $E(R)$ 的负梯度方向搜索新的系数集 $A(t+1)$ 和 $B(t+1)$,转步骤(2).
- (5) 由 $A(t)$ 和 $B(t)$ 生成 $\varpi_{p,q}(R)$.

如果取消上述第(2)步的循环出口,则得到的逼近有理分式将是全局最优的,但由于 R 是在有限集合中取值,可能导致寻优失败,因此,通过预设一个最大误差阈值 E_Δ 得到近似最优解.第(4)步采用负梯度方向作为最速下降方向来搜索新的系数集,在具体应用中,也可以采用深度优先的分支定界方法来搜索新的系数集.

3.4 视觉无缝算法

多投影显示墙颜色校正的目标是实现显示画面的颜色和亮度均匀,因此,需要根据投影仪的颜色模型和采样数据,求取显示墙的公共亮度响应,并进行逐个像素的色彩调整.在样本图像的生成与采集过程中,由于受到投影仪颜色失真、系统噪声以及数码相机曝光不足或过量等因素的影响,往往使样本图像出现一些离散的色彩畸变点.另一方面,考虑人眼的视觉特性,当上述孤立的畸变点在显示墙上分布得足够分散时,它们对画面的视觉效果影响极小.因此,如果在计算多投影显示墙的 CAR 区间之前能够识别并预先剔除这些畸变点,则可以有效地扩展显示墙画面的灰度级范围,从而提高画面显示质量,这是本文视觉无缝(visual-based seamless,简称 VSL)算法的基本思想.

为了搜索并剔除对视觉效果影响足够小的畸变点,VSL算法综合了模拟退火^[10]和遗传算法^[11]的优势,将模拟退火操作穿插在遗传算法的变异操作之后,虽然增加了每一代群体进化的开销,但使局部搜索得到优化,避免了搜索过程陷入局部最优解.通过种群中个体的反复遗传求精操作,逐渐淘汰孤立度较小的像素点,最后得到颜色差异和分散程度都较大的畸变点集合.在从样本集中剔除这些畸变点之后,再计算多投影显示墙的CAR区间,并生成逐个像素的调整因子集CAFS.根据上述分析,我们给出求解视觉无缝色彩调整因子的VSL算法.

由式(2)可以看出,畸变点的判断主要基于两个因素:与相邻像素的亮度差和在显示墙上的全局分散度.考虑到单个投影仪投影画面内部的亮度偏差一般较小,而投影区域边缘,尤其是不同投影仪对应的投影区域邻接处亮度差别较大,因此在构造适应性函数时,使用权函数 $w_i(x,y)$ 给不同区域赋予不同的权重.VSL算法采用如下的适应性函数来评估一个像素点的畸变程度:

$$f_i(x,y) = \frac{e^{\frac{\sigma_i \cdot w_i(x,y) \cdot D_i(x,y)}{W \times H \times m}}}{\sum_{i=1}^M e^{\frac{\sigma_i \cdot w_i(x,y) \cdot D_i(x,y)}{W \times H \times m}}} \quad (8)$$

其中, $f_i(x,y)$ 为第 i 个个体的适应度, σ_i 为第 i 个个体的方差, $w_i(x,y)$ 为权重函数, $D_i(x,y)$ 为屏幕上 (x,y) 处的亮度值在大屏幕上的分布系数, M 为当前种群容量, W 和 H 为子屏幕分辨率, m 为所有可能的亮度值个数.

算法 2. VSL 算法.

输入:分别对应于每个投影仪的黑屏和白屏样本集.

输出:逐个像素的色彩调整因子集 $\{CAFS_i\}, i=1,2,\dots,n$ 为投影仪编号.

(1) 预处理输入的黑屏和白屏图像样本,分别获取对应于黑、白屏样本的点集 $\{P_W\}$ 和 $\{P_B\}$.然后对多投影显示墙画面上的像素点进行二进制编码.考虑到搜索目标是最佳畸变点集合,因此,基因的编码使用了两个二进制码的串接,这两个二进制码分别对应于像素点在显示墙画面上的坐标 i 和 j .

(2) 统计 $\{P_B\}$ 和 $\{P_W\}$ 中亮度值的分布情况,并分别从 $\{P_B\}$ 中亮度最高的和 $\{P_W\}$ 中亮度值最低的 30% 像素点中随机产生一定数量的初始种群 $G_{B0}(t)$ 和 $G_{W0}(t)$.

(3) 进行种群 $G_{B0}(t)$ 和 $G_{W0}(t)$ 中的个体间选择、交叉和变异迭代,以逐步淘汰孤立度较小的像素点,得到新种群 $G_{B1}(t)$ 和 $G_{W1}(t)$.遗传迭代过程如图 4(a)所示.

(4) 对 $G_{B1}(t)$ 和 $G_{W1}(t)$ 中的个体分别调用个体模拟退火操作,从而得到具有更高整体畸变度的新种群 $G_{B2}(t)$ 和 $G_{W2}(t)$.个体模拟退火操作如图 4(b)所示.

(5) 将 $G_{B2}(t)$ 和 $G_{W1}(t)$ 中畸变度最大的 30% 个体直接复制到下一代中,并以权重相关的选取概率 P_i 选择剩余个体到下一代中,共同产生新一代种群 $G_{B0}(t+1)$ 和 $G_{W0}(t+1)$,其中,

$$P_i = f_i(x,y) \cdot w_i(x,y) / \sum_{i=1}^n f_i(x,y) \cdot w_i(x,y).$$

(6) 若连续 φ 代所包含的种群个体没有发生变化,则认为当前种群为最优或者近似最优的畸变点集合;否则,转步骤(3).其中, φ 为判断近似最优的终止阈值.

(7) 从 $\{P_B\}$ 中剔除 $G_{B3}(t)$ 中个体对应的像素点后得到 P_{B-N} ,并据此计算CAR区间的下限;同理,从 $\{P_W\}$ 中剔除 $G_{W3}(t)$ 中个体对应的像素点后得到 $\{P_{W-N}\}$,并从中获取CAR区间的上限.

(8) 参照颜色查找表和上述 CAR 区间逐个计算像素的调整因子集{CAFS}.

上述步骤(2)主要考虑到在通常情况下,多投影显示墙画面中畸变点所占比例不会超过 30%,而且当剔除的畸变点超过 30%时,已经无法保证画面的视觉无缝.对于步骤(3),我们认为,随着候选畸变点的选择、交叉和变异过程不断重复,虽然不能保证找到最优解,但通常能够很快地收敛到相当好的解.步骤(5)中除了将最适应的部分个体直接复制到下一代之外,还根据概率选择了剩余个体,是为了避免过高的选择压力,导致搜索过程陷入到一个局部极值,从而完全丢失全部最优解.由步骤(6)得到{CAFS}之后,根据几何校正结果,进一步将调整因子集转换为逐像素的调整纹理,即可利用多重纹理技术,实时地进行视觉无缝的颜色校正.

```

generation_counter=0; /*initiate inherit counter*/
termination_condition=fasle; /*initiate inherit termination condition*/
while (!termination_condition){
    selectParents(generation_counter); /*select parents from current population for intercross*/
    generation_counter++; /*update inherit counter*/
    introgressParents(generation_counter); /*apply intercross factor*/
    applyGenovariation(generation_counter); /*apply variation factor*/
    evaluateAdaptability(generation_counter,termination_condition); /*update terminate condition*/
}

```

(a) Genetic iteration

(a) 遗传迭代过程

```

T0=|x|; /*initiate temperature*/
Counter=0; /*initiate loop counter*/
While {
    rStart=randomize(1,|x|); /*create random start index, rStart<|x|*/
    rEnd=randomize(1,|x|); /*create random terminate index, rEnd<|x|*/
    x=randomRevise(x,rStart,rEnd); /*create new individual: x*/
    diff=E(x)-E(x); /*calculate energy increment*/
    if (diff<=0){
        acceptIndividual(x); /*accept the new individual*/
        continue; /*terminate current loop*/
    }
    if (exp(-diff/Ti)>randomize(0,1)){
        acceptIndividual(x); /*accept the new individual*/
        continue; /*terminate current loop*/
    }
}
if (T(x)<=DELTAtemp)
    break; /*exit if the new temperature is greater than given threshold*/
if (Counter>Delta) /*exit if the loop counter greater than given threshold*/
    break;
Counter++; /*anneal again*/
}

```

(b) Individual simulated annealing

(b) 个体模拟退火操作

Fig.4 Process for selection of distortion points

图 4 畸变点选择过程

4 误差分析与结果比较

4.1 误差分析

VSL 算法在两个尺寸分别为 1×3 和 2×2 的正投模式以及一个尺寸为 3×5 的背投模式多投影显示墙环境下得到验证.表 1 给出了在处理不同类型的投影墙黑屏和白屏样本图像时的统计结果.

从表 1 可以看出,在全局亮度偏差 E_G 较大时,只要剔除的畸变点具有足够大的孤立性,仍然能够实现视觉无缝的多投影显示墙颜色校正,这是 VSL 算法与严格 CAR 算法的主要不同点.因为在组成多投影显示墙的每个投影仪内部都存在着少量的严重偏亮和严重偏暗畸变点,如果使用严格 CAR 算法求取公共亮度响应区间,那么这

些畸变点的亮度值将成为公共亮度响应区间的端点值,从而过度压缩了多投影显示墙的有效颜色范围,人为地降低了显示画面的质量和亮度.VSL算法则借助于搜索技术,预先检测并剔除亮度畸变点,从而有效改善了多投影显示墙的显示画面.下一节的结果将显示,与保证全局亮度偏差足够小的严格CAR算法相比,存在适当全局亮度偏差的视觉无缝算法可以得到更好的校正结果.

Table 1 Isolation factor of distortion points and global intensity error

表 1 畸变点平均孤立度和全局亮度偏差

Display wall size	Display wall type	White screen		Black screen	
		I_E	E_G	I_E	E_G
1×3	Front	0.785 2	0.562 4	0.812 1	0.651 0
2×2	Front	0.623 8	0.634 1	0.693 0	0.712 4
3×5	Back	0.596 0	0.595 7	0.636 8	0.673 3

4.2 结果比较

为了比较基于不同类型 CAR 的颜色校正算法对多投影显示墙亮度和画面质量的影响,我们实现了文献[5]所描述的采用严格一致性 CAR 进行全局颜色校正的算法(记作严格 CAR 算法)和本文描述的视觉无缝算法,并分别在 1×3 的正投模式和 3×5 的背投模式多投影显示墙环境下,给出了投射真实场景和纯红色画面时的不同校正结果.

图 5 和图 6 分别给出了在 1×3 的正投模式显示墙上投射实际场景和显示纯红色画面时,采用视觉无缝校正算法与严格 CAR 算法得到的不同结果.可以看出,在投射实际场景时,视觉无缝技术能够很好地满足视觉上的亮度均匀性.同时,由于视觉无缝算法使用了剔除畸变点之后的 CAR 进行颜色映射,较大幅度地扩展了多投影显示墙的灰度级范围,从而提高了画面质量和整体亮度.



(a) Visual seamless algorithms
(a) 视觉无缝算法



(b) Restricted CAR algorithms
(b) 严格 CAR 算法

Fig.5 Calibration result comparison of dynamic scene

图 5 动态场景校正结果比较



(a) Visual seamless algorithms
(a) 视觉无缝算法



(b) Restricted CAR algorithms
(b) 严格 CAR 算法

Fig.6 Calibration result comparison of solid color backgrounds

图 6 纯色背景校正结果比较

图 6(a)和图 6(b)更清楚地显示了视觉无缝算法的优势.在相机曝光量和环境光照条件基本相同的情况下,两幅图分别给出了显示纯红色图案时,视觉无缝算法和严格 CAR 算法得到的不同校正结果.可以看出,采用视觉无缝算法的多投影显示墙画面具有更高的亮度.

图 7(a)和图 7(b)分别给出了在 3×5 的背投模式多投影显示墙环境下,采用严格 CAR 算法和本文描述的视觉无缝算法的校正结果.容易看出,当组成显示墙的投影机个数增加到 15 时,由于发生畸变像素点的数量显著增加,这时,如果采用严格 CAR 算法,则屏幕的亮度将被进一步降低,同时,画面质量下降也更加严重.而采用视觉无缝算法剔除孤立分布的畸变点后再计算 CAR 区间,可以显著提升多投影显示墙的整体亮度和画面质量.

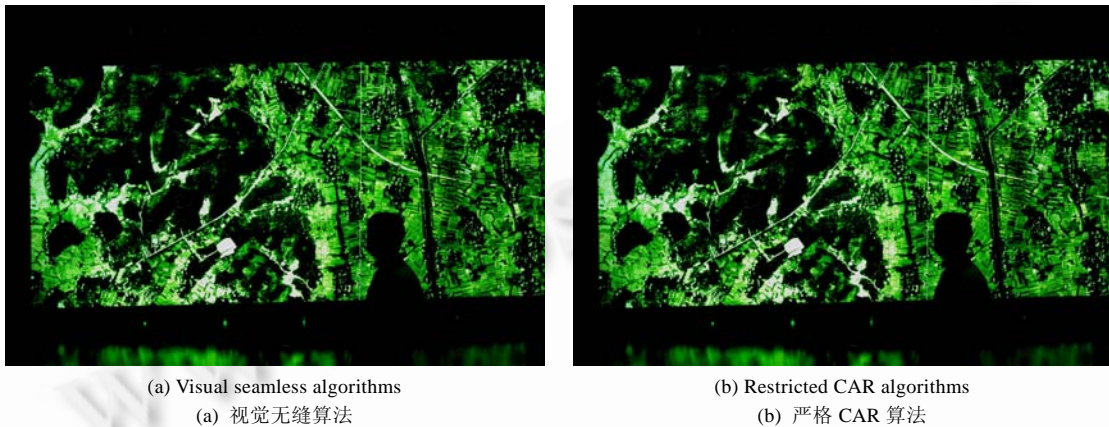


Fig.7 Calibration result comparison of static scene

图 7 静态场景校正结果比较

5 结 论

多投影显示墙通过若干台普通投影仪的拼接组合来提供高亮度、高分辨率的显示平台,在虚拟环境、数字化商业展出和科学计算可视化等领域中有广阔的应用前景.多投影显示墙的画面校正目标是实现屏幕画面的几何对齐和颜色均匀.本文引入一种广义颜色模型来刻画投影仪在多投影显示墙环境下的亮度响应特性,并通过有理函数逼近来获取颜色查找表.然后,在几何校正和广义颜色模型的基础上,提出了基于搜索技术的视觉无缝方法.最后,通过对两个尺寸分别为 1×3 的正投模式以及一个尺寸为 3×5 的背投模式多投影显示墙的校正实践,对上述算法的有效性进行了验证.

References:

- [1] Yang RG, Majumder A, Brown MS. Camera based calibration techniques for seamless flexible multi-projector displays. IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics, 2005,11(2):193–206.
- [2] Majumder A, Stevens R. Color nonuniformity in projection-based displays: Analysis and solutions. IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics, 2004,10(2):177–188.
- [3] Raskar R, Welch G, Fuchs H. Seamless projection overlaps using image warping and intensity blending. In: Proc. of the 4th Int'l Conf. on Virtual Systems and Multimedia. Gifu: IOS Press, 1998. 179–188.
- [4] Chen H, Sukthankar R, Wallace G, Li K. Scalable alignment of large-format multi-projector displays using camera homography trees. In: McPherson A, ed. Proc. of the Conf. on Visualization 2002. Washington: IEEE Press, 2002. 339–346.
- [5] Majumder A, He Z, Towles H, Welch G. Achieving color uniformity across multi-projector displays. In: Ertl T, Hamann B, Varshney A, eds. Proc. of the IEEE Visualization. Los Alamitos: IEEE Press, 2000. 117–124.
- [6] Raji A, Gill G, Majumder A, Towles H, Fuchs H. PixelFlex2: A comprehensive, automatic, casually-aligned multi-projector display. In: Sukthankar R, ed. Proc. of the IEEE Int'l Workshop on Projector-Camera Systems 2003. IEEE Press, 2003. 203–211.

- [7] Majumder A, Stevens R. Perceptual photometric seamlessness in projection-based tiled displays. ACM Trans. on Graphics, 2004, 3(9):111-132.
- [8] Debevec PE, Malik J. Recovering high dynamic range radiance maps from photographs. In: Whitted T, ed. Proc. of the Computer Graphics, Annual Conf. Series, ACM SIGGRAPH. New York: ACM Press, 1997. 369-378.
- [9] Chen GD, Cheng M, Wang GJ. Rational approximation of offset curves by parametric speed approximation. Chinese Journal of Computers, 2002,25(9):1001-1007 (in Chinese with English abstract).
- [10] Zhu MX, Song ZW, Cai QS. A multi-agent model and its applications based on simulated annealing. Journal of Software, 2004, 15(4):537-545 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/15/537.htm>
- [11] Zhang L, Zhang B. Research on the mechanism of genetic algorithms. Journal of Software, 2000,11(7):945-953 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献:

- [9] 陈国栋,成敏,王国瑾.基于参数速度逼近的等距曲线有理逼近.计算机学报,2002,25(9):1001-1007.
- [10] 朱孟潇,宋志伟,蔡庆生.一种基于模拟退火的多主体模型及其应用.软件学报,2004,15(4):537-545. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/15/537.htm>
- [11] 张铃,张钺.遗传算法机理的研究.软件学报,2000,11(7):945-953.



王修晖(1978—),男,河南封丘人,博士,讲师,主要研究领域为计算机视觉,图形图像处理技术,虚拟现实.



华炜(1972—),男,博士,副研究员,主要研究领域为计算机图形学,计算机辅助几何设计,虚拟现实.



林海(1965—),男,博士,研究员,主要研究领域为科学计算可视化,Web 技术,虚拟现实.



鲍虎军(1966—),男,博士,研究员,博士生导师,主要研究领域为真实感图形学绘制技术,虚拟现实.