

一种基于光线追踪的实时光场校正方法

乐 帅 蒋晓瑜 于海洋 严志强
陆军装甲兵学院信息通信系 北京 100072

摘要: 光场三维显示是一种基于光场理论的显示技术,通过控制显示光线的方向、强度、颜色等信息,在空间中重构出真实场景的光场,使观看者能够从不同的角度观察到物体的不同部分。在多投影光场三维显示系统中,为保证显示效果通常需要进行光场校正。本文通过分析多投影光场显示系统中误差产生的原因,研究通过透视变换进行光场校正的可行性,并提出了一种基于光线追踪的实时光场校正方法,在光线渲染前对基元图像像素坐标进行预先校正,避免了透视变换算法处理高分辨率图像所带来的计算负担。实验表明,该方法有效校正了光场显示中投影光线的偏移,校正耗时小于1ms,实现了实时光场校正。

关键词: 三维显示;光场校正;透视变换;光线追踪

A real-time light field calibration method based on ray tracing

Shuai Le, Xiaoyu Jiang, Haiyang Yu, Zhiqiang Yan

Department of information communication, Army Academy of Armored Forces, Beijing, 100072

Abstract: Light field 3D display is a display technology based on light field theory. By controlling the direction, intensity, color, and other information of the displayed light rays, it reconstructs the light field of a real scene in space. This enables viewers to observe different parts of an object from various angles. In multi-projection light field 3D display systems, light field calibration is often necessary to ensure the display quality. This paper analyzes the sources of errors in multi-projection light field display systems and explores the feasibility of using perspective transformation for light field calibration. A real-time light field calibration method based on ray tracing is proposed. It involves pre-calibrating the pixel coordinates of primitive images before ray rendering, effectively avoiding the computational burden caused by perspective transformation algorithms when processing high-resolution images. Experiments demonstrate that this method effectively corrects the projection ray offsets in light field displays. The calibration process takes less than 1ms, achieving real-time light field calibration.

Keywords: 3D display; light field calibration; Perspective transformation; Ray tracing

光场三维显示系统^{[1][2]}需要对光线进行精准的调制,然而,在多投影光场显示系统中,由于硬件装配误差、投影光线偏移等原因,导致实际投影光场分布和理想分布存在偏差,影响了其显示效果的准确性,因此需要进行光场校正。常用的光场校正方法^[3]是对计算好的基元图像(Element Image, EI)进行透视变换,以使得投影光线分布符合理想情况,但其处理图像的用时与图像分辨率呈线性关系,达不到实时校正的需求。本文提出了一种基于光线追踪的实时光场校正方法,将EIA生成与

透视变换过程相结合,直接生成校正后的基元图像阵列(Element Image Array, EIA),以实现实时校正。

一、多投影光场显示系统误差分析

基元图像阵列是一种对三维场景的二维描述方式。然而,在实际应用时直接将生成的EIA输出至投影阵列会导致重构的光场发生畸变,无法形成正确的三维图像,其原因主要包括两部分:一方面是硬件结构误差,由于EIA生成算法通常是基于理想的投影阵列光场设计,即假设投影阵列的位置分布、光轴指向等都符合理论设计,而在实际系统中硬件结构庞大复杂,很难保证每个投影仪的安装位置和角度都完全符合设计要求,单个投影仪本身也存在装配误差;另一方面则是因为投影平面与投影仪投射方向并不垂直,投影图像还会发生畸变,影响光线的准确调制。

基金项目: 本研究由国家重点研发计划(2017YFB1104500);国家自然科学基金(61775240)资助
作者简介: 乐帅(1995-),男,汉,湖北荆州人,从事计算机图形学和三维显示方面的研究,硕士。

1. 硬件结构误差

硬件结构误差主要包括投影仪装配误差和安装误差。投影仪装配误差是指在投影仪制造过程中，由于各种因素导致的投影仪的组件、部件或结构与设计要求之间的误差。在目前的制造工艺下，装配误差不可避免的会存在，由于本系统中大量投影仪均向同一区域投射光线，这些误差会累加并严重影响显示效果，需要进行校正。

安装误差则是在将安装投影仪组成投影阵列时产生的。本文中系统使用108台投影仪组成投影阵列，投影阵列以全息散射膜中心为圆心弧形排列，投影仪间隔为0.5°圆周角。然而，在实际安装中不可避免的会存在偏差，需要进一步的校正。

2. 投影图像畸变

如图1所示，本系统投影阵列中所有投影仪均向位于投影阵列圆心处的全息散射膜投射光线，可以看出大部分投影仪的投射方向与全息散射膜并不垂直，这会导致光线以斜角照射到投影平面上，投影物体在投影平面上出现拉伸或压缩的情况，即出现图像畸变。

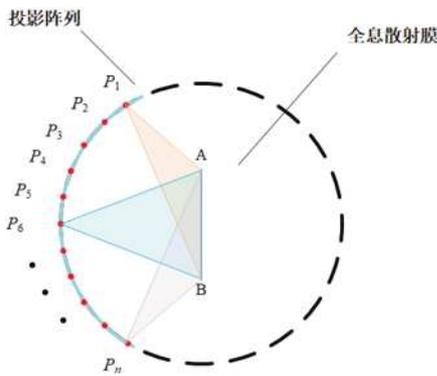


图1 投影平面示意图

二、光场校正原理

针对上述原因产生的误差，可以对EI进行透视变换进行光场校正。透视变换 (Perspective Transformation) 是一种用于图像处理和计算机视觉的技术，用于将一个平面上的图像投影到另一个平面上。

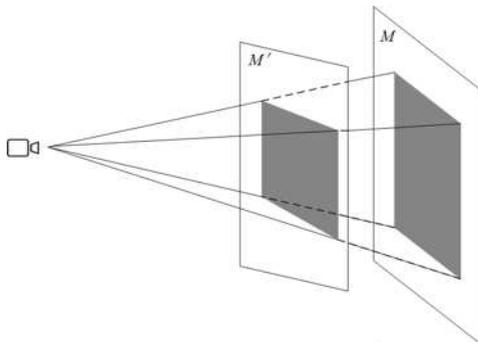


图2 透视变换原理图

如图2所示，投影仪在垂直于其投射方向的平面M上投射出的是矩形，而在与其有一定倾斜角的平面M'上

投射出的则是不规则的梯形。两平面上投射出的图像满足透视变换的关系，设投影仪投射出的同一光线在平面M、M'处所成像素坐标分别为(x, y)和(x', y')，则其满足如下关系：

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

其中，设

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & 1 \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

A即为表征像素坐标映射关系的透视变换矩阵。对比透视变换原理与上文中分析的误差原因可以发现，投影仪的输入图像与实际投影图像之间同样满足透视变换关系，即输入图像上任一像素点坐标(x, y)与实际投影图像上对应点坐标(x', y')满足式1.1。透视变换矩阵包含8个未知量，根据变换前后4组对应点的像素坐标即可列出矩阵方程求解。

光场校正的原理就是对输入图像即EI进行逆变换以消除各种误差对投影图像的影响。在数学上，逆变换就是对透视变换矩阵求逆矩阵，然后使用逆矩阵对图像进行变换，即：

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = A^{-1} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

首先需要确定上述对应点坐标。先在投影平面处设立一与全息散射膜相同大小的投影屏幕，在该屏幕上标记四个目标点，通过测量各个点在投影屏幕上的相对位置距离可计算这四点的坐标。而后，在投影仪上加载一幅有四个控制点的输入图像并投射到投影屏幕上。

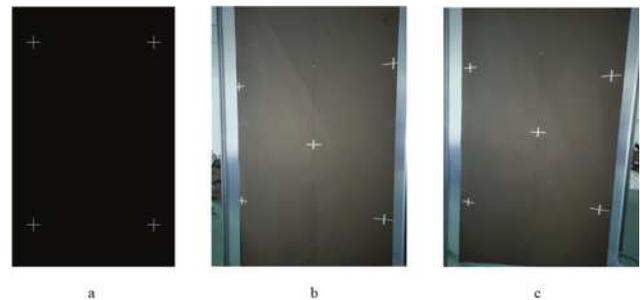


图3 确定对应点坐标

(a) 输入图像；(b) 校正前；(c) 校正后

如图3所示，调整这四个点的坐标使其与屏幕上目标点重合，记录此时四个控制点在输入图像上的坐标。根据这四组对应点的坐标，结合式1.3计算出该投影仪的逆变换矩阵。在光场重构时，对每个投影仪对应的EI分别进行变换，然后再投射到投影平面处以获得理想的像

素分布，有效校正了由于前述原因导致的光场畸变。

三、基于光线追踪的光场校正方法

通过对EI进行透视变换可以实现对光场的校正，但无法满足实时的要求，主要有以下两方面原因：一是透视变换的时间复杂度主要取决于图像的大小，假设输入图像的大小为 $M \times N$ ，那么透视变换的时间复杂度将是 $O(M \times N)$ ，而本文涉及到的三维显示系统输出的EIA分辨率达到8K(7680×4320)，对其进行透视变换需要数秒才能完成；二是在进行透视变换前，还需要先将EIA分割为各个投影仪对应的EI，变换完成后的EI还需重新拼接成EIA再输出至投影仪阵列，图像分割和拼接会带来额外的计算负担。

考虑到透视变换的实质是逐个像素计算其在变换前的坐标，在原图像对应像素点处获取其RGB值，而本系统的EIA生成方法是基于光线追踪技术，逐个像素生成采样光线而后渲染得到RGB值，结合这两者得到基于光线追踪的光场校正方法，其具体实现步骤如下：

1. 测量计算得到每个投影仪的4组控制点的坐标，根据其计算透视变换矩阵；
2. 创建透视变换矩阵缓冲区，将算得的透视变换矩阵写入到缓冲区；
3. 在逐像素生成光线时，在该缓冲区中查找像素对应投影仪的透视变换矩阵，计算变换后的像素坐标。然后，使用变换后的像素坐标计算该像素对应的光线方程。
4. 使用蒙特卡洛路径追踪算法，执行后续的光线渲染，直接生成校正后的EIA。

光线生成和光线渲染过程是在GPU上并行进行的，每个CUDA内核负责EIA中的一个像素，因此该校正方法只需在内核函数中增加一个像素计算的过程，这种方法的时间复杂度不再取决于图像大小，而是固定为 $O(1)$ ，因此能够满足实时校正的需求。

四、实验验证与总结

结合本文中系统对上述光场校正方法进行了实验验证。图4为使用的多投影光场三维显示系统，该系统由投影阵列、全息散射膜和渲染平台组成。投影阵列参数如表1所示，渲染平台参数如表2所示。



图4 多投影式光场三维显示系统

表1 投影阵列参数

参数名称	参数值
投影仪分辨率	1280 × 720
投影仪数量	108个
投影仪分布半径	1700mm
投影仪分布间隔	0.5°
投射比	1.3
视场角 (FOV)	54°

表2 渲染平台参数

参数名称	参数值
CPU	Intel Core i7-11700K @ 3.60GHz
GPU	NVIDIA GeForce RTX 3080 10GB
内存	32GB
系统	Microsoft Windows 10 64bit
光线追踪引擎	NVIDIA Optix 6.5.0
运算支持	CUDA toolkit 10.2

渲染平台通过显卡的4个视频输出口输出4个分辨率为4K的EIA，EIA输出到分屏器后分割成9个1280×720的EI并输出给对应的投影仪，其校正效果如图5所示。

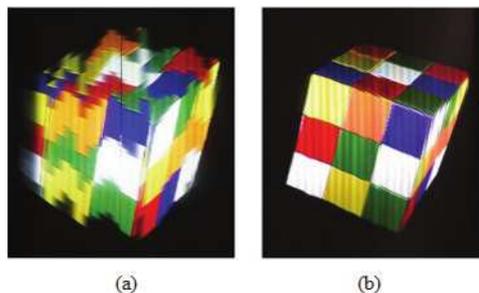


图5 未校正(a)与校正后(b)三维显示效果

可以看到，本文提出的方法有效校正了光场畸变，得到了较好的三维显示效果。且由于本方法的实现基于CUDA并行架构，每个像素的校正时间花费小于1ms，对整个多投影式光场三维显示系统的EI生成带来的额外开销可以忽略不计，实现了实时光场校正。

参考文献：

- [1]谭祺瑞，路海明，卢增祥，吉吟东.基于空间三维物体重构的光场显示技术综述[J].清华大学学报(自然科学版), 2018, 58(09): 773-780.DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxxb.2018.22.044.
- [2]马群刚，曹良才，何泽浩，张盛东.Progress of three-dimensional light-field display [Invited][J].Chinese Optics Letters, 2019, 17(11): 31-37.
- [3]于海洋，蒋晓瑜，严志强，闫兴鹏，王晨卿.一种基于透视变换的多投影三维显示系统校正方法[J].信息技术与信息化, 2020(09): 162-164.
- [4]代勤，王延杰，韩广良.基于改进Hough变换和透视变换的透视图像矫正[J].液晶与显示, 2012, 27(04): 552-556.