

基于条纹调制度的多投影显示融合方法

肖朝¹ 苏显渝² 陈锋^{1*} 钟敏¹

¹成都信息工程大学光电技术学院, 四川 成都 610225

²四川大学电子信息学院, 四川 成都 610064

摘要 为了提升多投影显示系统的亮度融合速度,提出了一种基于结构光条纹调制度测量的多投影显示融合方法。该方法利用相机拍摄投影机投影在显示墙上的结构光条纹,计算出每个投影通道的调制度信息。同时,利用结构光条纹的相位信息构建投影机与相机间的亚像素级映射关系,并由此得出投影机每个像素点在显示墙上的调制度数据。将该调制度数据与边缘融合结果相结合可得出每个投影通道的亚像素级融合模板。该方法具有操作简便、测量速度快、测量结果不受环境光干扰等优点,应用领域非常广泛。理论分析和真实场景实验都证明该方法的有效性和可行性。

关键词 测量;多投影显示融合;调制度分析;结构光投影

中图分类号 TP391 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0412007

A Fusion Method for Multi-Projector Display Based on Fringe Modulation

Xiao Chao¹ Su Xianyu² Chen Feng¹ Zhong Min¹

¹College of Optoelectronic Technology, Chengdu University of Information Technology,
Chengdu, Sichuan 610225, China

²College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China

Abstract In order to improve the light fusion speed in multi-projector display system, a multi-projector display fusion method based on modulation information of structured light fringe is proposed. In this method, camera is used to capture the structured light fringes on the display wall which are projected by projectors, and then the modulation information for every projection channel is calculated. Meanwhile, the sub-pixel mapping relationship between projector and camera can be built by the phase of structured light fringes. With the above relationship, the modulation value for every pixel on projector can be obtained. Using both the modulation value and the edge blending results, we can generate the final sub-pixel fusion mask for each projection channel. The proposed method has the advantages of convenient operation, fast measurement speed and free of ambient light interference, and it has a wide application field. The theoretical analysis and real scene experiments both validate the effectiveness and feasibility of the proposed scheme.

Key words measurement; multi-projector display fusion; modulation analysis; structured light projection

OCIS codes 120.6650; 100.2650; 150.6910

1 引言

多投影拼接显示系统^[1-2]是为了满足越来越多的领域对大尺寸高分辨率显示需求的不断增长而出现的。该系统通常由多台投影机共同拼接组成,相邻的投影通道间存在重叠区域。为了使不同投影机的投影

收稿日期: 2015-10-19; 收到修改稿日期: 2015-11-15

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ490879)、成都信息工程大学科研基金(KYTZ201516)

作者简介: 肖朝(1982—),男,博士,讲师,主要从事信息光学和三维数字图像处理方面的研究。

E-mail: xiaochao@cuit.edu.cn

*通信联系人。E-mail: robinchan@cuit.edu.cn

画面相互无缝拼接并且亮度色彩达到视觉一致的显示效果,几何校正^[3-4]和亮度融合^[5-6]是两个最主要的环节。国内外已有多个科研机构提出解决方案,产生了大量优秀的科研成果。在进行亮度融合的研究中,当前主流的方式是使用数码相机的高动态范围(HDR)技术测量显示墙上的投影区域亮度,但这种方式需要拍摄大量亮度不同的照片,操作繁琐且极其耗时,不能满足快速测量的要求。本文提出一种新的基于调制度^[7-8]测量的多投影显示融合方法,该方法利用调制度与亮度之间成比例的关系,使用调制度信息替代亮度信息进行投影区域的信息测量,并生成调制度融合模板。相比已有的基于亮度的测量方法,该方法每个投影通道仅需投影拍摄若干幅(通常4幅即可)特征图就可以完成测量,测量速度有了很大的提升。同时,该方法能够消除环境光的干扰,使得测量结果更准确。实验结果表明,利用该方法可以快速且较为准确地得到测量数据,从而实现亚像素级的融合效果。

2 基本原理

基于调制度的多投影显示融合方法主要由投影机与相机间亚像素级映射关系构建,投影画面调制度测量,调制度融合模板生成等环节组成,图1给出了该方法的实现原理图。

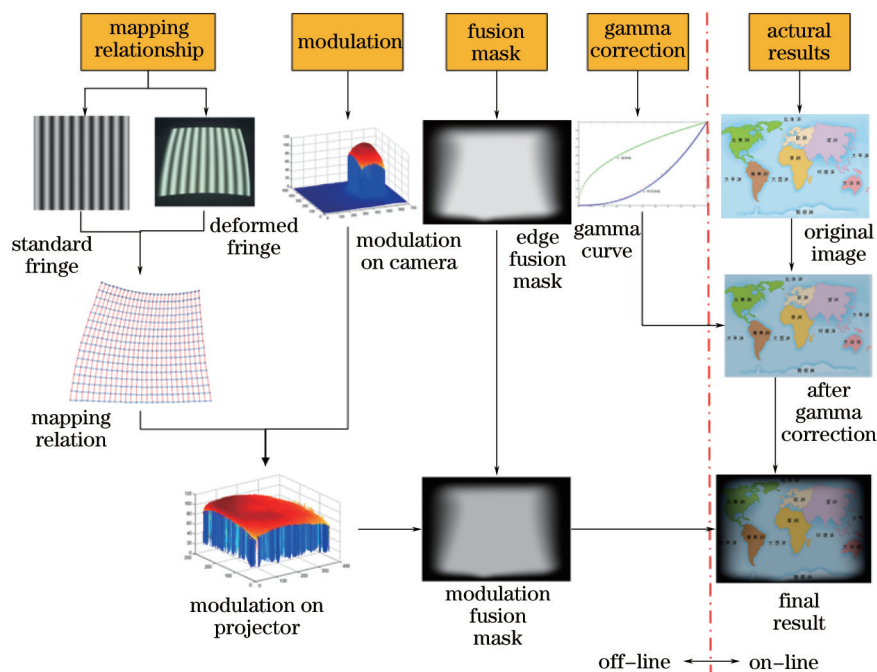


图1 调制度融合原理图

Fig.1 Principle sketch of modulation fusion

红色虚线左边部分为离线操作实现,右边部分为在线实时渲染生成。在构建投影机与拍摄相机间亚像素级映射关系的环节中,用投影机投影经过编码的一系列结构光^[9-12]正弦条纹图,并依次用相机进行拍摄。分别对投影机投影条纹和相机拍摄的变形条纹图进行相位展开,利用相位相等关系构建投影机与相机间的亚像素级映射关系。在调制度信息测量环节中,可以直接利用前面环节中相机拍摄的变形条纹图计算得到相机上的调制度信息,并利用投影机与相机间的映射关系生成投影机上每个像素点的调制度信息。然后基于几何校正结果生成每个投影通道的边缘融合模板,再与对应的调制度信息进行点乘得到每个投影通道的调制度融合模板。

2.1 投影机与相机之间的映射关系

投影机与相机之间的映射关系本属于几何校正的范畴,这里是为了利用该映射关系将相机上的调制度信息转换到投影机坐标系下。进行实际测量时,不需要单独构建该映射关系,只需借用几何校正的结果即可。

投影机投射画面到非平面显示墙上时,画面受到显示墙的调制会产生扭曲变形。同时,相邻通道间的投影画面在重叠区域存在错位现象。为了达到拼接完好的视觉一致的效果,需要对投影画面进行几何校正。

几何校正的方法有很多,其关键在于构建投影机与显示墙之间的映射关系,目前的主流方法是通过相机拍摄特征图像作为中间媒介。使用编码结构光作为特征图像,通过结构光的相位关系构建投影机与显示墙之间的映射关系。分别投影水平和垂直两个方向上的条纹,每组方向上投影 12 幅条纹,根据条纹周期不同分为 3 组,在每组中使用 4 步相移实现。结构光条纹可以表示为:

$$I_v(x,y) = a(x,y) + b(x,y)\cos(2\pi x/p + 2\pi q/4) \quad p = 1, 10, 100 \quad q = 0, 1, 2, 3, \quad (1)$$

$$I_p(x,y) = a(x,y) + b(x,y)\cos(2\pi y/p + 2\pi q/4) \quad p = 1, 10, 100 \quad q = 0, 1, 2, 3, \quad (2)$$

式中 x, y 分别表示在 x, y 轴上的位置, p, q 分别表示条纹周期个数和相移步数, $I_v(x, y)$ 表示垂直方向上结构光条纹的光强, $I_p(x, y)$ 表示水平方向上结构光条纹的光强, $a(x, y)$ 是条纹图的背景光强, $b(x, y)$ 称为条纹图的调制光强或者条纹对比度。

将相机拍摄的显示墙上的变形条纹和投影机投射的标准条纹进行时间相位展开可以表示为:

$$p_1 = \arctan\left(\frac{i_4 - i_2}{i_1 - i_3}\right) + \pi, \quad (3)$$

$$p_2 = \arctan\left(\frac{i_8 - i_6}{i_5 - i_7}\right) + \pi, \quad (4)$$

$$p_3 = \arctan\left(\frac{i_{12} - i_{10}}{i_9 - i_{11}}\right) + \pi, \quad (5)$$

$$\varphi_1 = \text{INT}[(p_1 \times 10 - p_2)/2\pi] \times 2\pi + p_2, \quad (6)$$

$$\varphi_2 = \text{INT}[(\varphi_1 \times 10 - p_3)/2\pi] \times 2\pi + p_3, \quad (7)$$

以条纹周期个数分别为 1、10、100 的 3 组条纹, 每组条纹进行 4 步相移为例。 p_1, p_2, p_3 分别表示 3 组条纹的截断相位, $i_1 \sim i_{12}$ 分别为不同周期和相移的条纹图, $\text{INT}[\cdot]$ 表示取整, φ_2 表示最终的相位展开。

进行相位展开后, 投影机坐标系上每个像素点都具有唯一的水平相位值和垂直相位值, 同时相机坐标系上有特征条纹的区域上每个像素点也具有唯一的水平相位值和垂直相位值。在投影机坐标系上, 任取一像素点 A , 在相机坐标系上找出与点 A 的水平相位值和垂直相位值分别相等的点 B (通常为亚像素点)。基于时间相位展开得到的是绝对相位值, 利用相位相等关系一定能够建立投影机上像素与相机上像素的一一对应关系。如此遍历整个投影机坐标系, 即可构建投影机与相机之间的亚像素级映射关系式^[13]:

$$\psi_p = M(\psi_c), \quad (8)$$

式中 ψ_p 和 ψ_c 分别表示投影机和相机坐标系上展开后的条纹绝对相位值, M 表示投影机与相机之间的映射关系矩阵。

2.2 调制度的测量

在基于结构光的三维测量中, 调制度是一个非常重要的信息, 它可以综合考量待测物体表面的反射率、光强等物理量。基于条纹相移的调制度^[14]计算公式可以表示为:

$$m(x,y) = \sqrt{\left[\sum_{n=0}^{N-1} I_n(x,y)\sin(2n\pi/N)\right]^2 + \left[\sum_{n=0}^{N-1} I_n(x,y)\cos(2n\pi/N)\right]^2}, \quad (9)$$

式中 $m(x, y)$ 表示条纹图中任一点的调制度, I_n 是第 n 次相移时的强度值, N 为条纹相移的步数。将(1)式与(9)式合并整理可得:

$$m(x,y) = \frac{1}{2}Nb(x,y). \quad (10)$$

可见, 条纹的调制度只与条纹的对比度有关, 而与背景光强无关。另外, 假设 $L(x, y)$ 为待测区域光强, 条纹对比度与区域光强之间的关系可以表示为:

$$b(x,y) = L(x,y) \times C, \quad (11)$$

式中 C 为对比度范围, 通常为 $[0, 255]$ 。综合(10)式和(11)式, 可知调制度与待测区域光强成正比, 因此可用调制度信息替代光强来进行多投影的亮度融合, 并且可以通过调制度的计算消除背景光, 即将测量时所受环境光的干扰降到最低。

针对每一个投影机,用相机拍摄其投影的结构光条纹图,计算得到投影机所对应的调制度信息。然后利用(8)式中投影机与相机之间的映射关系,可以计算得到投影机上每个像素点所对应的调制度信息,可以表示为:

$$m_p(x, y) = M[m_c(x, y)], \quad (12)$$

式中 $m_p(x, y)$ 和 $m_c(x, y)$ 分别表示投影机坐标系下像素点的条纹调制度和相机坐标系下的条纹调制度。

测量出所有投影机的调制度信息后,综合比较找出一个期望的公共调制度数值 d_m (该值通常是所有数据中比较小的),每个投影机的像素坐标所对应的调制度修正模板 $m_r(x, y)$ 可以表示为:

$$m_r(x, y) = \frac{d_m}{m_p(x, y)}. \quad (13)$$

2.3 调制度融合模板生成

在多投影拼接显示系统中,为了实现视觉无缝效果,相邻通道间会留有投影重叠区域。在重叠区域的光强由于叠加会比非融合区高,故需要对重叠区域进行融合处理。在复杂场景中,一个重叠区域会有多达 5、6 个投影机的画面,并且投影融合区形状极不规则,融合难度很大。

使用文献[15]中提出的基于最优化理论的边缘融合模板计算方法,利用下式中的带参分段函数作为边缘融合函数,实测效果优于文献[15]中的余弦函数:

$$f(w) = \begin{cases} a(2w)^p & (0 \leq w < 0.5) \\ 1 - (1 - a)[2(1 - w)]^p & (0.5 \leq w \leq 1) \end{cases}, \quad (14)$$

式中, w 表示相邻通道融合区的宽度并进行归一化处理; a 表示亮度调节系数, $a \in [0, 1]$ 。当 $a < 0.5$ 时,融合区的中心变暗,当 $a > 0.5$ 时,融合区的中心变亮。 p 表示融合函数的阶次,通常选为 2。 a 和 p 作为可调参数可根据实际应用的需要进行动态调节。

计算得到每个投影机所对应的边缘融合模板后,将边缘融合模板与对应的调制度修正模板进行点乘,即可得到每个投影机最终的调制度融合模板,可以表示为:

$$F(x, y) = m_r(x, y) \times m_{\text{mask}}(x, y), \quad (15)$$

式中, $m_{\text{mask}}(x, y)$ 表示边缘融合模板, $F(x, y)$ 表示调制度融合模板。可以看出,边缘融合模板只是对每个投影通道的重叠区域进行处理,对非重叠区域则不作处理;而调制度修正模板则是对整个投影区域进行处理,因此二者进行运算后可得到全部投影区域的调制度调节模板系数。

最后需要说明的是,由于投影机自身设计的原因,其输入与输出不成正比,因此在进行调制度测量和边缘融合模板计算前,需要先测量出每台投影机的非线性响应曲线(伽马曲线),并对其进行线性化操作,否则无法通过调整投影机的输入亮度来控制投影机的输出亮度。

文献[16]中的亮度响应函数模型可以表示为:

$$f(x) = A \frac{x^\alpha}{x^\beta + C}, \quad (16)$$

式中, x 为投影机的输入, $f(x)$ 为投影机非线性响应函数(投影机的输出), A 、 C 、 α 、 β 为待测参数,可以通过非线性最小二乘拟合方法根据实测数据计算得到。

3 实验与结果讨论

实验场地是一个穹顶型多投影显示系统,显示墙底部是直径 13 m,高 3.8 m 的圆柱面,顶部是直径 13 m,高 2.7 m 的非规则椭球面。显示墙画面由 24 台投影机(松下 SXGA+7000)以 10+10+4 的方式由下而上分三层投影拼接组成。由于投影机位置的摆放具有相对随意性,因此融合区的形状极不规则。图 2 为实验环境的局部图片。实验装置如图 3 所示,在一个三脚架上放置可精确控制旋转的云台(Zolix SC300-2B),该云台的旋转精度为 0.00125°/step。在云台上安装相机(Canon EOS 6D),使用焦距为 14 mm 的定焦镜头,照片分辨率为 5472 pixel×3648 pixel,用一台主机控制云台的旋转以及相机的拍摄。

由于针对每一个投影通道的处理方式都一样,不失一般性,以第 16 号投影机(位于投影阵列第 2 层)为例进行实验结果阐述。首先投影并依次拍摄 24 幅结构光编码条纹,然后基于时间相位展开算法对标准条纹和

变形条纹分别进行相位展开,利用相位关系构建投影机与相机坐标系之间的亚像素级映射关系。图4为相机拍摄一幅垂直方向结构光条纹的场景,图5为拍摄得到的一幅特征条纹图。



图2 局部实验环境

Fig.2 Local experiment environment

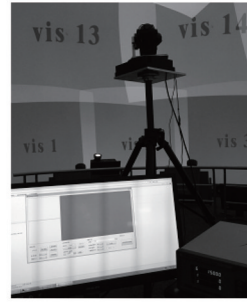


图3 实验的软硬件平台

Fig.3 Software and hardware platform of experiments

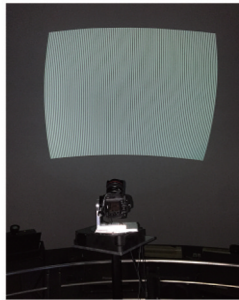


图4 显示墙上的结构光条纹

Fig.4 Structured light fringes on display wall

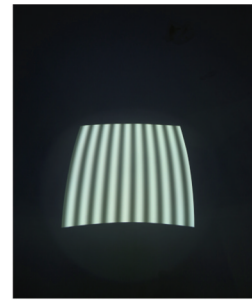


图5 相机中的变形条纹

Fig.5 Deformed fringes on camera

利用拍摄得到的变形条纹图构建投影机与相机间的亚像素级映射关系,然后根据(9)式计算条纹调制度,获得相机坐标系下投影区域内每个像素的调制度信息。在实际测量时,为了避免相移不准或者其他因素导致的调制度噪声,在进行调制度测量时,单独投影4幅特殊的结构光相移图像,每幅图像上所有像素点的相位值均相等,4幅图像的相位分别为 0 、 $\pi/2$ 、 π 、 $3\pi/2$ 。图6为使用相机拍摄特征条纹计算得出的相机坐标系下的调制度信息。图7为根据相位关系将相机坐标系下的调制度映射到投影机坐标系后的示意图。为了验证该方法的有效性,图8给出了修正前24个投影通道的平均调制度与用(13)式修正后24个投影通道的平均调制度对比。

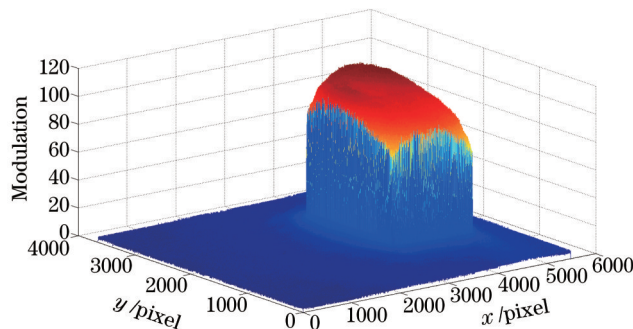


图6 相机坐标系下的调制度分布

Fig.6 Modulation distribution on camera coordinates

从图8中可以看出,修正前,不同投影通道间的调制度差异较大,这个与投影机灯泡损耗程度不同、投影机在显示墙上的投影面积不同、相机拍摄时与显示墙的距离有差异等多种因素有关。修正后不同投影通道间调制度数值的差异性有了明显改善。

图9和图10为在穹顶显示系统中实时运行塔台虚拟机场的场景,该区域由4个投影画面共同拼接组成。其中图9只对边缘进行了融合处理,而图10则同时进行了边缘融合和调制度处理。在图9的右下角区

域,该投影通道的亮度偏高,经过调制度映射处理后,亮度一致性在整体上有了较大改善,如图10所示。

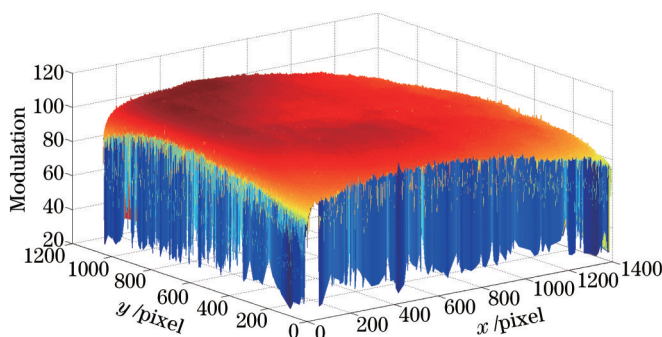


图7 投影机坐标系下的调制度分布

Fig.7 Modulation distribution on projector coordinates

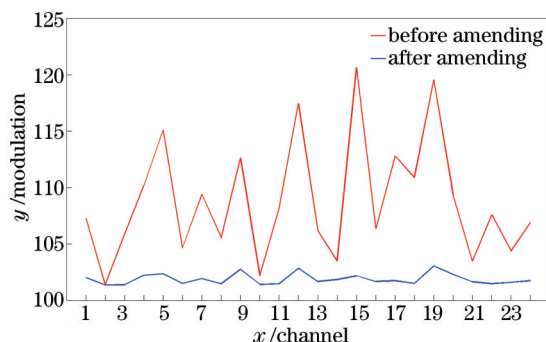


图8 修正前后投影通道调制度分布对比

Fig.8 Modulation distribution contrast among projection channels before and after amending

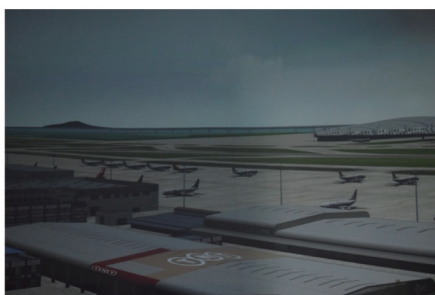


图9 仅进行边缘融合处理效果
Fig.9 Effect only using edge blending

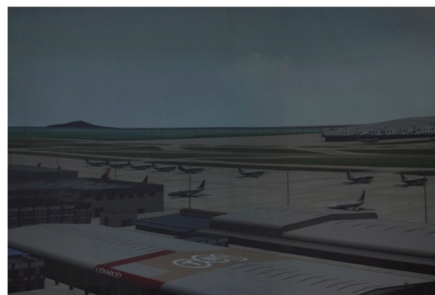


图10 同时进行边缘融合和调制度处理效果
Fig.10 Effect using edge blending and modulation operation

在已有的基于亮度信息的多投影融合算法中,主要分为两种类型:基于光学仪器(照度计、分光辐射度计等)的亮度测量方式^[17]和基于相机的亮度测量方式^[18]。前者使用专业光学设备进行测量,后者使用数码相机的HDR技术通过获取多个曝光时间的照片来进行测量。表1给出了提出的方法与已有的两种常见方法的优劣势比较。

表1 提出的方法与已有方法的优劣势对比

Table 1 Advantage and disadvantage contrast among proposed method and existing methods

Methods	Equipment cost	Time consuming	Operation complexity	Ambient light interference	Accuracy of results
Optical equipment method	High	Very high	Very high	Yes	Very high
HDR method	Low	Very high	High	Yes	High
Proposed method	Low	Low	Low	No	High

从表1中可以看出,使用专业光学设备进行测量可以获得精确的亮度值,但仪器价格昂贵同时测量复杂而且耗时;使用相机的HDR方法进行测量时,假设有 n 个不同的曝光时间,对于每个投影通道的采集样本很多($3 \times 256 \times n$),而且上述两种方法在测量时都会受到环境光的干扰,对测量结果会产生一定影响。而采用基于调制度的方法进行测量时,测量每个投影通道的调制度信息只需投影拍摄4幅结构光条纹图像,测量复杂度低,所需时间很少,而且能够消除环境光的干扰。

图11和图12给出了基于HDR方法的融合结果和基于调制度模板方法的融合结果的比较。从图11和图12的对比中可以看出,基于HDR方法的融合效果与基于调制度信息计算的融合效果相差不大,在主观上基于调制度计算的效果在整体一致性上稍好一些。



图11 基于HDR方法融合效果

Fig.11 Fusion effect using HDR method

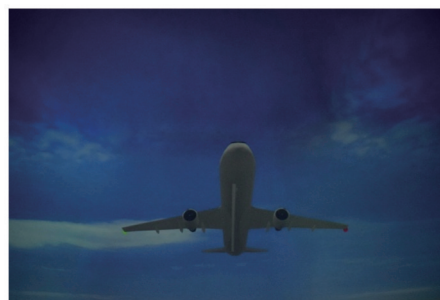


图12 基于调制度模板融合效果

Fig.12 Fusion effect using modulation mask method

最后需要说明的是,调制度测量及映射矩阵计算、边缘融合模板计算、伽马曲线测量以及调制度融合模板计算均为离线处理,最终得到的调制度融合模板用数据文件的形式保存。在多投影显示系统的实际应用中,GPU读取调制度融合模板数据,将实时渲染出的纹理画面与模板数据进行乘法运算。由于GPU是并行渲染,因此速度非常快,非常适用于对实时性要求较高的领域。

4 结 论

提出了一种基于结构光条纹调制度的多投影显示融合方法。该方法利用结构光调制度与亮度成正比的特性,使用结构光调制度信息来替代传统的光强亮度信息进行多投影拼接融合。与普通的光强亮度信息相比,调制度信息可以消除环境光干扰,并且只用很少的特征图像就可以计算出投影区域的调制度信息。实验结果表明,利用该方法可以快速且较为准确地对多投影显示系统进行融合,与现有方法相比在测量时间和操作复杂度上有了显著改善,该方法在对实时性要求较高的工程领域具有良好的应用前景。

最后需要指出的是,提出的方法在投影通道间选取公共调制度数值时,采用的是最小化原则,这样可以保证不同投影通道间调制度信息绝对一致,但会导致最终输出的渲染图像偏暗,后续可以进一步研究以改善这一现状。

致 谢 感谢四川大智胜软件股份有限公司提供具有24台投影机的穹顶显示系统进行实验验证。

参 考 文 献

- 1 Sajadi B, Majumder A. Autocalibration of multiprojector CAVE-like immersive environments[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2012, 18(3): 381-393.
 - 2 Liu Shu, Ruan Qiuqi, Li XiaoLi. The color calibration across multi-projector display[J]. Journal of Signal and Information Processing, 2011, 2: 53-58.
 - 3 Sajadi B, Majumder A. Autocalibrating tiled projectors on piecewise smooth vertically extruded surfaces[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2011, 17(9): 1209-1222.
 - 4 Xiao Chao, Yang Hongyu, Liang Haijun, et al.. Geometric calibration for multi-projector display system based on structured light[J]. Journal of Computer-Aid Design & Computer Graphics, 2013, 25(6): 802-808.
- 肖 朝, 杨红雨, 梁海军, 等. 多投影显示系统结构光几何校正算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2013, 25(6): 802-808.

- 5 Luo J L, Qin K H, Zhou Y X, *et al.*. GPU Rendering for tiled multi-projector autostereoscopic display based on chromium[J]. *The Visual Computer*, 2010, 26(1): 457-465.
- 6 Zhou Yanxia, Qin Kaihuai, Luo Jianli. Gpu-based geometric and photometric corrections for multi-projector autostereoscopic display [J]. *Journal of Computer-Aid Design & Computer Graphics*, 2011, 23(4): 561-570.
周艳霞, 秦开怀, 罗建利. 多投影仪自由立体显示的 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 Dou Yunfu, Su Xianyu, Chen Yanfei. A fast modulation measurement profilometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(7): 1858-1862.
窦蕴甫, 苏显渝, 陈延非. 一种快速的调制度测量轮廓术[J]. *光学学报*, 2009, 29(7): 1858-1862.
- 8 Shao Shuangyun, Su Xianyu, Zhang Qican, *et al.*. Application of modulation measurement profilometry in complex object shape measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(12): 1623-1628.
邵双运, 苏显渝, 张启灿, 等. 调制度测量轮廓术在复杂面形测量中的应用[J]. *光学学报*, 2004, 24(12): 1623-1628.
- 9 Tang Minghui, Cheng Xiaosheng, Cui Haihua, *et al.*. A high stability mapping stitching method for structured light three-dimensional measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(11): 1112006.
汤明辉, 程筱胜, 崔海华, 等. 面向结构光三维测量的高稳定映射拼接方法[J]. *光学学报*, 2014, 34(11): 1112006.
- 10 An Dong, Gai Shaoyan, Da Feipeng. A new model of three-dimensional shape measurement system based on fringe projection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(5): 0512004.
安冬, 盖绍彦, 达飞鹏. 一种新的基于条纹投影的三维轮廓测量系统模型[J]. *光学学报*, 2014, 34(5): 0512004.
- 11 Cai Huaiyu, Feng Zhaodong, Huang Zhanhua. Centerline extraction of structured light stripe based on principal component analysis[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(3): 0308006.
蔡怀宇, 冯召东, 黄战华. 基于主成分分析的结构光条纹中心提取方法[J]. *中国激光*, 2015, 42(3): 0308006.
- 12 Su Xianyu, Zhang Qican, Chen Wenjing. Three-dimensional imaging based on structured illumination[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(2): 0209001.
苏显渝, 张启灿, 陈文静. 结构光三维成像技术[J]. *中国激光*, 2014, 41(2): 0209001.
- 13 Xiao Chao, Su Xianyu, Jing Hailong. A new method for generation of inverse projected fringe[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(11): 2120-2124.
肖朝, 苏显渝, 荆海龙. 一种新的反向投影条纹生成方法研究[J]. *光学学报*, 2008, 28(11): 2120-2124.
- 14 Su Likun, Su Xianyu, Li Wansong, *et al.*. 3D profilometry based on modulation measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, 19(9): 1257-1262.
苏礼坤, 苏显渝, 李万松, 等. 基于调制度测量的三维轮廓术[J]. *光学学报*, 1999, 19(9): 1257-1262.
- 15 Zhang Jun, Wang Bangping, Li Xiaofeng. An edge blending method for multi-projectors display system with anomalistic overlap regions [J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2010, 42(1): 149-155.
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, 42(1): 149-155.
- 16 Zhang Jun. Computational methods for key problems in large-scale high-immersion virtual space building and their applications[D]. Chengdu: Sichuan University, 2010: 89-103.
张军. 大规模高沉浸感虚拟空间构建中的关键问题求解方法研究及其应用[D]. 成都: 四川大学, 2010: 89-103.
- 17 Majumder A, Stevens R. Lam: luminance attenuation map for photometric uniform across a projection based display[C]. *Proceedings of the ACM symposium on virtual reality software and technology*, New York: ACM, 2002: 147-154.
- 18 Majumder A, Stevens R. Perceptual photometric seamlessness in projection-based tiled display[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2005, 24(1): 118-139.

栏目编辑: 何卓铭