

引用格式:彭源琨,魏梦蝉,张宜春.混合现实环境投影映射技术发展综述[J].中国传媒大学学报(自然科学版),2023,30(01):20-31.
文章编号:1673-4793(2023)01-0020-12

混合现实环境投影映射技术发展综述

彭源琨¹,魏梦蝉²,张宜春³

(1.东北大学,沈阳110819;2.中国传媒大学,北京100024;3.中国艺术科技研究所,北京100007)

摘要:本文对投影映射技术近十年发展现状进行综述,介绍了与投影映射技术相关联的算法、硬件的最新发展状况。总结了投影映射中核心的三维几何校准算法发展状况,包括各类自校准和半自校准算法的研究进展。与此同时,本文介绍了动态投影映射的研究进展,包括刚体投影和非刚体投影的发展。最后,本文从硬件发展的角度,给出了当前投影机硬件在解决动态范围、刷新率、空间分辨率、景深、视图相关性和颜色空间等领域问题的进展和存在的问题。

关键词:投影映射;几何校准;自校准;光照校准和光照补偿;全局照明

中图分类号:TP391 文献标识码:A

Survey on advances in projection mapping in the last decade

PENG Yuankun¹, WEI Mengchan², ZHANG Yichun³

(1.Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2.Communication University of China, Beijing 100024, China; 3. China Institute of Arts Science&Technology, Beijing 100007, China)

Abstract: This latest report covers the latest advances in algorithms, hardware within pojection mapping. This article summarizes new improvements to simplify the 3D geometry calibration task, which can now be done interactively or automatically and reliably using self-calibration methods, and then introduces research advances in dynamic projection mapping, including rigid dynamic projection and non-rigid dynamic projection. Improvements in radiation calibration and compensation and the elimination of global illumination effects are then summarized. Finally, from the perspective of hardware development, computational display methods are introduced to overcome the technical limitations of current projection hardware in terms of dynamic range, refresh rate, spatial resolution, depth of field, view relevance, and color space. These technologies help create new application areas related to projection-based spatial enhancement.

Key words: projection mapping; geometric calibration; self-calibrating; radiation calibration and compensation; global illumination

1 引言

在过去的十多年里,投影映射或空间增强现实在世界范围内得到了广泛应用。其目标是通过将计算

机生成的图形叠加到真实表面上,通过人眼的视觉错觉效应,无缝地融合物理和虚拟世界。与其他增强现实技术相比,它最大的优势在于具备较强的用户体验感,用户无需佩戴眼镜或任何其他设备,即可得到身

作者简介(*为通讯作者):彭源琨(1995-),男,硕士研究生,主要从事异形面投影研究。Email:pengyuankun12@163.com;魏梦蝉(1996-),女,硕士研究生,主要从事交互投影研究。Email:wmengchan@163.com;张宜春(1978-),男,副研究员,主要从事文化科技应用基础理论研究。Email:zhangyichun@vip.sina.com

临其境的感受。随着投影机性能的不不断提升,使得越来越多的人能够开发设计自己的投影映射项目。人们使用各种的投影表面作为投影对象,包括建筑、汽车、家具,甚至是真实表演的舞蹈演员。在投影映射的应用场景中,迫切需要投影映射能够在环境光照条件下,在非平面、纹理表面或动态移动的表面上投射出所期望的效果。为满足这些需求,研究人员开发了多种算法,通过应用“投影机-摄像机系统(ProCams)”来投影几何和光度校正图像。这些 ProCams 系统,使用摄像机观察投影到真实表面上的图像,并根据观测到的图像进行估计,从而调整投影内容,以达到所需的增强现实效果。

目前实用的投影机主要用于黑暗环境,所投射的投影面多为平面的、均匀的白色静态屏幕,其并不完全适合大多数投影映射的应用场景,特别是在动态范围、帧速率、延迟、空间分辨率、景深和设备的可显示色域等关键参数上,现有投影机硬件仍有诸多限制。投影机硬件的这些技术限制使得即使应用了各类图像增强算法,也难以达到期望的视觉质量。于是,研究人员应用了新兴的“计算显示”方法,将显示硬件、光学处理算法和计算机处理算法相结合,从而克服这些限制^[1]。

本文总结了投影映射在算法和硬件两方面解决实际应用问题的最新进展。所介绍的算法包括可用于多投影机系统的基于“投影机—摄像机”系统的自动校准工具、用于动态投影映射的几何校正算法以及用于纹理表面的光照补偿算法。硬件部分则介绍了投影机硬件在高动态范围、高速投影、高分辨率、宽自由度、视图依赖性和宽色域投影等性能方面的进展。最后对基于投影映射技术的研究成果进行了总结并指出了未来的发展方向。

2 相关算法

投影映射技术是使用投影机投射预先制作的内容,将画面投射到特定的投影面上,让观众产生相应的视觉错觉,从而扭曲对于现实场景的认知,形成一种区别于真实物理世界的增强现实效果。要达到最终的投射呈现效果,在大多数投影映射的场景中都需要着力解决两个问题:(1)如何把预制的内容投射到复杂的几何面上,同时保证画面在几何上不失真;(2)如何感知投射场景的颜色环境,以配合投射内容的色彩。

为了解决上述两个问题,首先需要对投影映射系统进行系统设置,完成两个重要的校准步骤,即:(1)几何校准(Geometric Calibration)——获得投影表面形状的精确建模以及所用投影机和相机的内部和外部参数;(2)光度校准(Photometric Calibration)——估算系统中各类输入和输出设备的内部颜色模型,获得投影表面的反射特性。

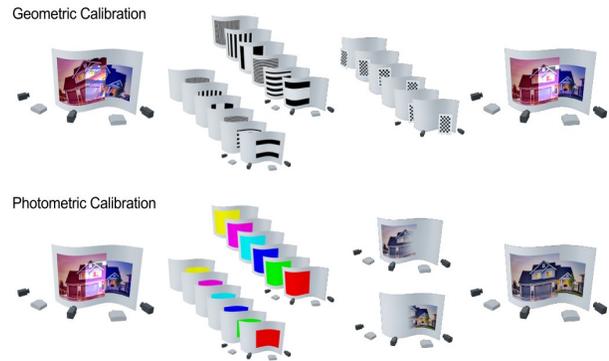


图1 大多数 ProCams 应用所需的基本校准步骤示意图

图1说明了几何校准和光度校准的基本工作流程。第一行是几何校准流程:摄像机用于捕获一系列投影的结构光图案,得到投影机投射内容和摄像机采集像素之间形成像素级甚至亚像素级精度的映射关系。通过多摄像机的校准程序,估计各个摄像机的光学特性以及相对于彼此的全局方向,并重建投影表面的几何形状,同时对投影机进行几何校准,以生成右上方所示的连续投影图像。下一行是光照校正流程:投影机系统会投影不同颜色和光强的图案,通过摄像机的采集反馈,估计投影机的内部色彩模型,判断投影表面上的反射特性。同时结合几何校准的信息,最终生成光度均匀的投影图像。

2.1 投影机-摄像机系统的几何校准

投影映射在大型场馆的专业应用中变得越来越流行,各类厂商开发了相应的软件工具来简化投影机的校准和安装工作。这些工具包括,微软^[2]免费提供的基于 Kinect 的 RoomaliVetolkit, Scalable 公司^[3]提供的 Scalable Desktop、Scalable Panel Assembly、Scalable Panel Assembly、Scalable Atlas, Chrisite 公司^[4]提供的 Christie Twist、Christie Twist Premium 与 Twist Pro, Vioso 公司^[5]提供的 VIOSO6、VIOSO6 SIM、EXAPLAY, Green Hippo 公司^[6]提供的 Hippotizer, MXWendler 公司^[7]提供的 MXWendler StageDesigner。迪士尼公司^[8]为主题公园景点开发的 ProCams 工具包。

(1) 半自动 ProCams 校准方法

目前校准投影机的方法,大多数都是先从校准摄像机开始。校准摄像机的方法有多种,但是最为通用的方法是由张等人^[9]提出的,使用一个带有棋盘图案的平面标记板(俗称标定板),将摄像机多次拍摄此板所得到的信息与标定板的自身属性做对比,从而估计出摄像机的焦距、主视点等硬件参数,由此可校准摄像机镜头的内外参数。Richardson 等人^[10]在张的基础上做了方向优化,提出了一种迭代算法,从当前的校准结果中估计出下一次拍摄的最合适的方向,从而提高校准精度。

在具有至少两个已校准好的摄像机的基础上,就可以使用结构光图案以获得摄像机和投影机之间的对应关系,从而进行投影机校准。Harley 等人^[11]先用摄像机拍摄所需投射的投影面,然后对投影面的点云信息做三角化处理,投影机把图案投射到投影面上,投射出来的图像就会有一个3D到2D的点—像素对应关系,然后用直接线性变换(DLT)来估计投影矩阵,最终算出投影机的内外参数,进行投影机的校准。

为了减少使用多摄像机的工程复杂度,研究者又提出了使用基于同形图的平面校准方法。Audet 等人^[12]提出了一种基于棋盘图的校准方法,用摄像机拍摄标定板,得到摄像机的内外参数,然后用投影机去投射与标定板相同的图案,摄像机再去拍摄此投影面,若无法匹配标定板的图案,则做逆变换处理以此来校准投影机的内外参数。Yang 等人^[13]在此基础上使用斑点自识别算法简化了上述过程,提高了校准的速度和精度。Din 等人^[14]提出了把投影机看成是摄像机的逆模型,并使用结构光图案来估计单个摄像机。

(2) 自校准方法

除了采用基于同态的平面校准方法进行校准估计外,目前还提出了几种用于 ProCams 的自校准方法,但大都是实验性的算法。Yamazaki 等人^[15]提出一种放射基础矩阵算法,来求解投影机的内外参数,但该算法要求主视点(光轴在投影面上的位置)具有接近理想投影面的像素精度,这在现实生活中很难实现。Sajadi 等人^[16]提出了一个可以校准多摄像机—投影机的系统,但要保证所有的摄像机都具有相同的焦距且没有发生任何的畸变,因此在实际应用中,很难完成精确的校准。

Garcia 等人^[17]提出使用双平面传感器对立处理的方法,结合稀疏束调整(SBA)和张的方法^[9],但仅在特定的设置中取得好的结果,无法处理复杂的设置。

最近 Garridio 等人^[18]提供了一种较灵活的方法,但需要预知投影机的内参,且还要做各种调焦的处理。

李等人^[19]提出的方法需要知道摄像机主视点和焦距的先验知识,但只能进行粗略的自校准,对于投影机提出了一个变焦自校准的方法,但需手动完成缩放,实际操作非常复杂。Resch 等人^[20]提出的方法需已知投影面的三维几何模型信息,再加上关于焦距的先验信息,目前还不能普遍适用。

Willi 等人^[21]提出了一种通用方法,无需任何先验知识,就能实现完全自校准,但需有至少两个摄像机。该法采用了一种自适应的、对图像外边缘不敏感的算法,以此来实现放射基础矩阵估计,从而实现了设备的校准和投影面的重建。但若在室外应用此方法,则会出现误差积累,导致校准精度显著下降。

2.2 动态投影映射

由于 CPU 和 GPU 的计算能力快速发展,高速摄像机和投影机日益得到广泛使用,越来越多的动态投影映射系统已经问世。值得注意的是,大部分系统都是基于刚体/非刚体变换或通过移动投影机/摄像机来定义动态投影映射的,并且这些系统都需要达到非常低的延迟效果。

(1) 刚体动态投影

关于刚体动态投影的方法主要是用投影机对几何体进行姿态估计,然后用设备渲染已知的几何刚体的计算机图形。目前应用视觉标记点可实现稳定的姿态估计,但附加在投影面上的标记点会干扰投影的画面效果。

为了解决该问题,Asayama 等人^[22]将标记点视为投影面的纹理,通过应用光照补偿技术在视觉上消除这些标记,进而实现动态投影。Kitajima 等人^[23]用微型光电传感器来代替这些标记,以测量来自激光投影机的投影光束的扫描时间。通过光栅扫描机制,测量六个以上的光电传感器的扫描时间,从而识别这些投影光束的像素坐标,以此来进行投影面的姿态估计,从而实现动态投影。

Resch 等人^[24]提出了一种利用低分辨率在线重建的方法来进行投影机配准。他们通过使用投影特征和相对应的摄像机像素,利用三角测量法来在线测量投影面的形状,再利用张的迭代算法^[9]进行六自由度运动估计,进而实现动态投影。Siegl 等人^[25]通过求解光传输矩阵来优化动态投影图像,该矩阵由每个投影机和 Kinect 深度传感器测量的物体之间的6自由度关

系得到。Hashimoto 等人^[26]也提出了使用红外摄像机的相关方法。Lincoln 等人^[27]提出了一种基于法向量信息的动态移动刚体对象的最佳投影分配方法。Bermano^[28]使用多个投影机投射到一个可变形的电动化硅头上,通过叠加多种高频细节来丰富其外观。

克服因系统所导致的感知延迟也是投影映射目前正在展开的研究领域。Watanabe 等人^[29]提出了一个基于视觉标记的方法,利用 1000 Hz 的高速投影机实现了低延迟的动态投影效果。

Takashi 等人^[30]在动态投影映射中引入现代渲染技术,如路径跟踪。为了解决路径跟踪渲染耗时长和动态投影映射渲染帧率高这两个问题,作者提出应用视觉暂留效应原理。即在动态场景中,以 947 帧/秒的速度来投影(路径跟踪的)图像,使得投影图像能够与人的视觉感知相整合。投影图像与物理运动、观察者视点一致,且具有延迟低和逼真度高的特点。Masumi 等人^[31]提出一种使用 ProCams 系统的隐形投影方法。该方法与航空图像显示技术中的高速跟踪方法相结合,即对单个红外摄像机应用高速跟踪和全方位投影技术相结合的方法。

(2)非刚体动态投影

Punpongsanon 等人^[32]提出一种将动态投影映射到可变形对象上的解决方案:通过在投影面上绘制基于红外油墨的不可见标记点来实现,该标记点可由红外摄像机测量,用来估计非刚体投影面的变形情况并能够相应地调整投影。Narita 等人^[33]用一个高速摄像机来稳定地跟踪与上述相同的不可见油墨绘制的点簇标记。Fujimoto 等人^[34]将反光标记用于测量投影面变形情况。但这种方法不能实现完全的动态跟踪。田等人^[35]扩展了点簇标记,实现了投影到动态对象上的效果。

Bermano 等人^[36]提出一种使用投影来动态增强人脸的系统。它应用于无标记人脸跟踪,根据各种参数的描述使得面部基础网格做出适当的变形,来估计出当前表情的样子,并根据所估计出的表情、时间、所需的灯光以及面部的空间位置来动态调整相应的面部表情纹理。为了实现低延迟的效果,不仅需要投影机和摄像机在光学上做好对准,还需使用扩展卡尔曼滤波器(EKF)来进行数据优化。

Siegl 等人^[37]提出了一种基于深度传感器的动态投影映射系统,使用光学未对准的深度相机和多个投影机进行动态投影。但此系统的延迟较为严重,并不适用于快速运动。

在非刚体动态投影的研究中,如何有效处理投影面中的细微形变(几何误差、未对准)和清晰轮廓(伪影),仍然是一个挑战。Ahmed 等人^[38]设计了一种自适应的基准标记方法来模拟非刚体投影面的变形情况,实现对可变形的非刚体投影面的准确跟踪,并将纹理投影到其上,确保不会出现可见的错位。

传统的投影映射方法依赖于投影面上的标记点,或者需要知道投影面的形状/材质的先验知识,因此限制了投影面的应用。而 Miyashita 等人^[39]研究由投影面法线来表征虚拟场景中虚拟材质的阴影。在无可见光干扰的情况下处理各种投影面,实时测量红外区域内的投影面的法线,在屏幕空间中使用高速纹理算法计算投影材质的阴影。

Gomes 等人^[40]提出一种算法来预测非刚体投影面的运动,使用互连的质量—弹簧—阻尼器系统来模拟投影面,使用基于卡尔曼滤波器的算法来预测投影面位置,并对投影的延迟和快速移动进行补偿,该算法可使用低成本设备。

Sueyoshi 等人^[41]提出了一种系统,通过使用拉普拉斯算子在两个尺度上应用跟踪技术来实现更灵活、更鲁棒的性能,并且无需标记就能将有形的投影图像映射到非刚体的、可移动的片状植物(如树叶)上。

2.3 投影机-摄像机系统的光照测量控制

(1)局部光照补偿

基本的光照补偿方法在摄像机和投影机之间的光调制建模为线性矩阵乘法。Nayar 等人^[42]提出了一种基于颜色混合矩阵的经典方法,这种光照补偿方法将摄像机和投影机之间的光调制转化为线性矩阵乘法。

当投影到具有强饱和性的投影面上时,需要进行误差补偿处理来避免由于投影机有限的色域导致的视觉干扰。Law 等人^[43]提出了一种方法,能够自动调整可显示色域之外的投影颜色,以减轻视觉干扰形成的伪像问题。Menk 等人^[44]提出通过基于光谱测量的物理计算方法,再结合 HDR 高动态范围成像,形成更精确的投影效果。Christoffer 等人^[45]在上述方法的基础上做了进一步改进,通过应用 3D 查找表(LUT)来描述投影机的颜色模型。

基于 DMD 芯片的投影机遇到多基色问题,于是 Grundhöfer 等人^[46]通过使用非线性薄板样条插值来实现内部非线性色彩处理,使得投影颜色更为精确。Grundhöfer 等人^[47]还改进了上述方法,提出一种

减少在强纹理边缘处感知伪像的方法。Mihara 等人^[48]提出通过高分辨率摄像机在每个投影像素区域观察到的潜在空间变化反射率,以此来实现精确的光照补偿。

由于投影机的位置与投影面的几何形状会对光照补偿投影的视觉质量产生显著影响, Law 等人^[49]提出通过自动计算最佳的投影机位置来实现最佳补偿结果。Li 等人^[50]提出通过像素覆盖范围和强度分布来确定最佳的投影机位置。

Hashimoto 等人^[51]提出通过实时估计像素间的对应关系,构造投影机与摄像机间的响应函数,通过响应函数来实现对非刚体投影面的光照补偿,实现对房间中晃动的幕帘进行跟踪投影。

(2) 相互反射补偿

由于投影面在凹处的漫反射会出现相互反射现象,会降低对比度,劣化投影图像质量,并导致投影图像的颜色出现畸变,因此处理凹处的漫反射问题,保障全局照明效果也是投影映射研究的一个热点。

Bimber 等人^[52]首先提出补偿这种相互反射的影响,通过将投影面细分为多个小块,然后进行全局照明计算,以此来估计互反射量。该法针对实时处理进行了优化,所以适用于交互式的应用场景中。随后, Christian 等人^[53]解决了动态环境中多个投影机遇到的上述问题。

Takeda 等人^[54]提出动态调节局部投影面反射率的方法,通过使用具有光致变色的UV反应性投影面,来调节投影面的反射率,以实现更好的相互反射补偿并提高感知对比度。Menk 等人^[44]提出一种基于模型的光照补偿技术,测量环境光的反射光谱分布,并用该数据计算出正确的补偿强度,以最大程度地来近似投影面上所需的颜色。

(3) 闭环光照补偿

为了在投影面上进行精确的几何投影,常用的方法是采用 Amano 等人^[55]提出的同轴 ProCams,应用闭环光照补偿模型来控制运动物体的外观。

投影机和摄像机的光学校准是一件相当麻烦的任务,因为校准必须在六个自由度上进行。Amano 等人^[56]将空间网格图案投影到不同形状的网格表面上,在移动摄像机的同时,通过观察摄像机来直接估计校准精度,从而达到令人满意的光学校准精度。同轴 ProCams 的原理也被应用到视觉操纵材料外观^[57],显微标本^[58],阴影错觉^[59]等领域中。后来扩展到了多个同轴 ProCams 投影同一个 3D 对象^[60]。Tsukamoto 等

人^[61]从理论上证明了多投影机的这种光照补偿方法具备算法上的收敛性。

(4) 端到端投影机光照补偿

投影机光度补偿是投影机输入的图像进行预处理,使其能够补偿来自投影面的物理干扰。黄等人^[62]首次将补偿问题表述为端到端学习问题,并提出了补偿神经网络 CompenNet,设计出隐式学习的补偿函数。CompenNet 由一个类似 UNet 的主干网络和一个自动编码器组成,利用摄像机捕获的投影图像和输入图像进行丰富的多级交互,以此来捕获投影面的光度和环境信息。处理效果见图 2。

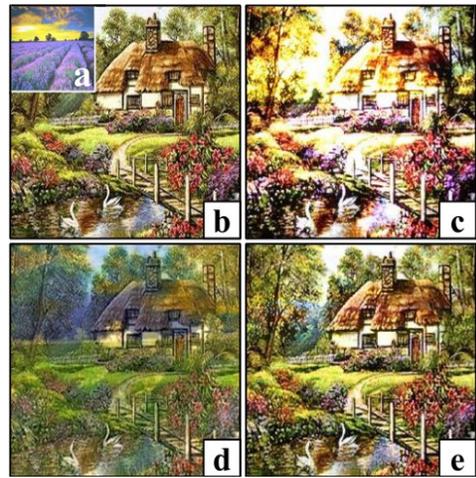


图2 投影机光照补偿

图 2 中(a)为正常光照下的具有纹理和颜色的投影表面, (b)为投影机投射的图片(也是我们想要看到的效果), (c)为摄像机拍摄到的没有补偿的投影结果, (d)为模型计算出的补偿图片, (e)为摄像机拍到的补偿后的效果,即将(d)投影到(a)上,比较(c)和(e),可以看到明显提升的效果和细节。

此外, Pjanic 等人^[63]提出一种新的光度补偿技术,用于投影机之间的亮度和色度变化。使用 RLab 颜色外观模型进行整体计算,该模型以自适应、感知的方式对颜色处理进行建模,实现自动生成改进的、一致的视觉质量来增加投影系统的无缝感知。并提出了自适应色域获取、空间变化色域映射和边缘混合优化框架,能显著地改善色彩处理严重不均匀的投影效果。

(5) 基于多维模型纹理表面的光照补偿

Li 等人^[64]将光照补偿问题归结为多维辐射传递函数的采样和重构,对投影机、摄像机的颜色传递函数和表面反射率进行建模,因此可以适用于多种具有

非线性颜色传递函数的投影机(例如DLP、LCOS、基于发光二极管或基于激光的投影机)。同时还提出一种新的多维数据插值技术,通过每个像素重建辐射传递函数,从而计算补偿图像,以此来实现更高的精度。

2.4 使用卷积神经网络的投影机去模糊

如果投影面是非平面,或者具有较为复杂的散射特性,在实际使用中可能会出现投影模糊的问题。Kageyama等人^[65]提出了一种不需要以真实捕获的图像作为训练数据的ProDebNet网络,是一种端到端的实时投影去模糊网络,以最小化的投影模糊来合成投影图像。此方法生成的投影图像,能非显式地估计投影屏幕的任何几何形状或散射特性,使得实时处理成为可能。还设计了一个“伪投影”合成数据集,很好地涵盖了真实世界的模糊数据。实验结果表明,在真实的投影场景中,所提出的投影去模糊网络能补偿两种主要类型的投影模糊,即散焦模糊和亚表面模糊。

3 硬件发展

投影映射效果的图像效果提升,既有赖于各类图像处理算法的改进,也有赖于投影机硬件设备性能的提升(甚至会对总体效果影响更大)。而且目前还出现了一种新的方法,即计算投影显示(一种显示硬件、光学和计算算法的联合设计^[1]),从而进一步提高任意投影面的投影图像质量。

3.1 高动态范围投影

投影机显示器的动态范围或对比度定义为最大亮度与最小亮度之比。现实世界中包含了室外的阳光光照环境,也包含了室内的纯黑烛光环境,真实场景的亮度变化大于100万。然而,目前的投影机,除了基于激光的设备,只能支持非常有限的动态范围,即同时发生的场景的对比度范围通常被限制在1000:1和6000:1之间^[66]。

HDR投影机是通过应用双调制原理实现的,在级联光阻空间光调制器(SLMs)上对光源的发射进行两次空间调制,例如数字微镜器件(DMD)或液晶显示器(LCD),以降低暗像素的亮度(或黑电平),同时保持明亮像素的亮度。Bimber等人^[67]提出了应用两个液晶面板的方法,当显示零强度值时,能够显著降低所感知到的黑电平亮度,成功增加了投影图像的动态范围。后来Hirsch等人^[68]应用了双LCoS(硅上液晶)设计,也降低了黑电平亮度。但是他们的方法并不能

同时增加峰值亮度,而峰值亮度是提升动态范围的最重要因素之一。Jones等人^[69]提出对投影面的反射模式进行空间调制,抑制黑电平的升高。通过调整投影机系统实现动态范围的优化。

Iwai等人^[70]研究了反射图案的动态调制,提出用光致变色材料覆盖投影面,从而通过施加紫外照明来控制投影面的反射。

此外,受最近的深度光学成像方法的启发,Metzler等人^[71]提出联合训练光学编码器和电子解码器,将优化过的光学元件作为硬件附加到传统投影机上,从而提升投影机的动态范围。

3.2 高速投影

投影映射应用通常需要投影的图像与投影面之间进行精确的校准。因此即使是很小的画面错位也会导致参与者的沉浸感体验严重下降。这就要求在动态投影映射场景中实现完美对齐,但是由于投影机的延迟,也会导致明显的画面未对齐。为了解决这种延迟问题,大部分的方法是选择应用高速投影机,将投影帧率提升到数百帧至数千帧。

Watanabe等人^[72]开发了一种投影设备,使用了数字微镜器件的镜面翻转模式以及临时调整的发光二极管强度,实现能够以高达1000 Hz的帧速率来投影8位单色图像。Watanabe等人^[29]提出结合使用高速摄像机(1000 FPS),使得该投影机能够在刚体和非刚体的投影面上实现动态投影映射,且不会出现明显的错位。Bermano等人^[36]使用了市售的480 Hz投影机,将高速ProCams应用于人脸的投影画面增强。Regan等人^[73]提出了一种使用高速投影机来减少由运动模糊所造成的伪影的方法。

对于采用投影机的虚拟现实或增强现实显示系统,提升投影机性能的关键参数是大景深和高速图像刷新率。Xu等人^[74]提出使用可变焦距透镜和高速投影机或伸缩控制方法来扩展投影的深度,使可变焦距透镜与高速投影机的关系同步。实验证明,所提出的系统能够在六个不同的平面上投射出聚焦良好且有动态变化的内容。其投影范围从0.3 m到1.5 m不等,刷新率为166.7 Hz。

3.3 高分辨率投影

由于人眼的空间分辨率较高,在观看距离较近的投影映射内容时,较亮的投影像素会被识别为矩形形状,因此对投影机的分辨率要求很高。目前有两种主

流方法来实现这个目标:(1)使用多个投影机来产生更高的分辨率。(2)使用一个投影机来产生更高的分辨率。

在多投影机的方法中,传统方法^[75]是平铺多个投影图像,采用多种技术使多个重叠投影机之间的重叠区域、亮度和色度的差异在视觉上不可察觉。考虑到人眼的视网膜视敏度的空间变化特性,Iwai等人^[76]提出使用两个投影机进行平铺:一个用于清晰的中心视觉,另一个用于周边视觉。Aliaga等人^[77]研究了基于投影的超分辨率方法,投影的图像以如下方式相互叠加:即图像相对于彼此做偏移处理,其中偏移量小于一个像素宽度。诸如最小二乘法的优化技术被用于计算每个投影图像以实现高分辨率的目标。由于亚像素偏移,超分辨率方法可以显示比单个投影机高得多的空间分辨率。

单投影方法在单个投影机中使用多个空间光调制器或特殊光学器件,以获得比普通投影机更高的分辨率。Allen等人^[78]提出了一种开创性的技术“摆动”,它在连续的帧中将DMD移动半个像素,使两个轻微移动的图像重叠。因为投影机的帧率是120 Hz,所以两个重叠的图像会在人眼感知下变成一幅图像。这种技术可以被视为一种时域的超分辨率方法,现在正被用作消费者级4K投影系统的标准方法^[79-81]。

Hirsch等人^[68]提出结合两个级联的空间光调制器,这两个调制器略微偏移,以实现高分辨率的图像投影。这种级联显示技术是一种乘法的超分辨率方法,理论上可以实现更高的分辨率。特殊的光学元件也被用于实现高分辨率的投影,Sajadi等人^[82]提出使用移位透镜光学来实现“半像素偏移”。Sajadi等人^[83]提出使用光学像素共享技术,在特定的区域(如边缘)使用较小的像素来提高分辨率。即,首先将投影的高分辨率图像分解为高分辨率但稀疏的边缘图像和互补的低分辨率非边缘图像。然后,这些图像以120 Hz的频率按时间顺序进行投影,以创建边缘增强图像,即像素密度不均匀但空间变化的图像。

3.4 增加焦深

投影机加大投射光的孔径,以尽量减少从光源发出的光的损失。然而,这种光学设计导致了聚焦深度较浅。因此,如果投影面有较大的深度变化时,投影画面会失焦,从而变得模糊。因此,提升投影机的焦深也是一个实际问题,特别是在动态投影映射的应用场景中,当被投影物体或投影机在空间大范围移动

时,对于投影机的焦深要求就更严苛。解决焦深的问题,一般分为两类:单投影机法和多投影机法。

经典的单投影机法^[84]:在投影之前对原始图像进行数字锐化,使得光学散焦投影非常接近原始(即未模糊)图像。投影图像的散焦模糊在数学上被解释为点扩散函数(PSF)和原始图像的卷积。如果正确估计了投影面上投影机的点扩散函数,则可以通过使用去卷积方法(如Wiener滤波器)对原始图像进行数字校正,来显示无散焦图像。但由于普通投影机的PSF通常是低通滤波器,因此这种技术会损失高频分量。目前,Ma等人^[85]使用具有二维复杂图案的编码孔径来代替普通的圆孔,以使景深更深。Iwai等人^[86]提出使用聚焦可调透镜(FTL)来扫描投影场景中的聚焦距离,使PSF不受场景深度的影响。

在多投影机法中,Bimber等人^[87]使用多个投影机实现了多焦点投影,每个投影机在一个独特的距离上有一个焦平面。对于投影面上的每一个点,他们都选择了一个最佳的投影机来投射,使得该空间点的位置能够显示最清晰的图像。Nagase等人^[88]提出一种基于模型的方法,即在投影面移动的情况下,也可以为每个投影面选择最佳的投影机。这是通过根据几何信息(例如投影面的形状、投影面与投影机的相对位置)来估计PSF来实现的。Nakamura等人^[89]设计了采用聚焦扫描技术的多投影系统,以此实现宽视场和扩展景深的投影效果。Bermano等人^[28]提出了更通用的方案,应用多投影机光传输矩阵,该矩阵依据每个投影机像素对摄像机图像(被视为观察图像)的影响关系进行建模,通过计算逆光传输矩阵来确定每个投影机的图像。

3.5 多光谱投影

目前的三色通道,即RGB色彩通道,投影机只能再现有限的色彩空间。几十年来,改善色域一直是投影显示设计领域中活跃的研究课题。开创性的多原色设计增加了原色的数量,使用光栅(7原色)^[90]或者滤色器^[91](6原色)来获得更大的色域。

大部分的研究内容是将自适应原色应用于多光谱投影,以获得更好的颜色再现和更高的光通量。目前已研究了各种自适应原色,此类系统的主要技术问题是最初原色的设计/选择和色域映射。Hirai等人^[92]提出将原色的光谱功率分布设计成覆盖在反射率数据库注册的真实世界对象的光谱功率分布,然后用

最小二乘算法来求解色域映射。Kauvar 等人^[93]提出将原色选择和色域映射都通过非负矩阵分解来共同解决,将目标图像分解成一组自适应原色和对应的像素值。

3.6 结合光学透视的投影映射

Yong 等人^[94]提出了一个新的基于投影的系统来展示一个真实的虚拟文物博物馆。他们将多投影映射技术与光学透视显示相结合,解决了由环境光和障碍物遮挡所导致的问题,克服了传统投影显示的局限性。他们还引入了一个可以机械移动的投影面,增加了投影内容的自由度。应用几何和光照校准方法将高质量纹理图像正确投影到移动的3D投影面上,且没有发生透视失真。

3.7 无阴影投影

无阴影投影机是一种新的投影映射系统,投影机不会因为被投射物遮挡,而产生投影阴影。典型的阴影去除技术使用了多重重叠投影系统。Hiratani 等人^[95]提出了一种使用单投影机进行无阴影投影的方法。采用了一种特殊的光学系统,该系统由系统定位的垂直镜子组成。这个光学系统就像一个具有大光圈的镜头,像手这样的小物体不可能阻挡住所有投射的光线,使得能够实现无阴影的投影效果。

此外,Nomoto 等人^[96]提出一种使用多个高速投影机将投影图像映射到动态场景的新方法。其方法是通过利用像素并行的方式来控制每个投影机的投影强度。由于每个投影图像具有低延迟性并可以实时更新,所以即使在复杂的动态场景中,也可以实现投影图像的自适应阴影去除。该系统还可以通过网络增加连接投影机的数量,设计成分布式的投影系统,实现投影画面各个像素的并行计算,因此有较高的可扩展性。

4 结论

本文涵盖了相关的投影映射研究领域的最新进展。3D几何校准任务现在可以通过半自动校准或全自动化的自适应校准方法完成。此外,本文还总结了在投影映射光度校准和补偿以及消除全局照明影响方面的算法改进。同时,本文还介绍了投影映射系统硬件方面的创新,包括动态范围、帧速率、空间分辨率和焦深等技术指标的改进方法。最后,本文还介绍了多光谱投影、结合光学透镜的投影以及无阴影投影的

投影系统。

综上所述,投影映射的未来研究将更加依赖于计算机图像处理、光学处理和硬件设计的综合应用。由于投影映射的硬件受到了诸多物理限制,包括衍射效应、数据带宽(如果像素数量进一步增加的话),能量效率、帧速率以及透镜质量和光吞吐量等诸多因素。克服这些问题变得越来越复杂,只有综合材料科学、光学处理、图像处理,才能提出有效的、与投影映射应用相关的算法,进一步提升投影画面的质量,进而提升人类的视觉感知。

参考文献(References):

- [1] Masia B, Wetzstein G, Dityk P, et al. A survey on computational displays: Pushing the boundaries of optics, computation, and perception [J]. *Computers & Graphics*, 2013, 37(8): 1012-1038.
- [2] Jones B R, Sodhi R S, Murdock M, et al. RoomAlive: magical experiences enabled by scalable, adaptive projector-camera units [J]. *ACM*, 2019.
- [3] Scalable Display Technologies. <http://www.scalabledisplay.com/>. Accessed: 2017-09-30.
- [4] Projection Mapping, Christie Digital Systems, Inc. <https://www.christiedigital.com/emea/business/products/projector-solutions/projection-mapping>. Accessed: 2017-09-30.
- [5] Vioso. <http://www.vioso.com/>. Accessed: 2017-09-30.
- [6] Green Hippo. <http://www.green-hippo.com/>. Accessed: 2017-09-30.
- [7] MXWendler. <http://www.mxwendler.net/>. Accessed: 2017-09-30.
- [8] Mine M, Rose D, Bei Y, et al. Projection-Based Augmented Reality in Disney Theme Parks [J]. *Computer*, 2012.
- [9] Zhang Z. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations [C]//Seventh IEEE International Conference on Computer Vision. IEEE, 1999.
- [10] Richardson A, Strom J, Olson E. AprilCal: Assisted and repeatable camera calibration [C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots & Systems. IEEE, 2013.
- [11] Hartley R, Zisserman A. Multiple view geometry in computer vision/2nd ed [M]. Cambridge University Press, 2003.
- [12] Audet S, Okutomi M. A user-friendly method to geometrically calibrate projector-camera systems [C]. IEEE, 2009:47-54.
- [13] Yang L, Normand J M, Moreau G. Practical and precise projector-camera calibration [C]//IEEE International Symposium on Mixed & Augmented Reality. IEEE, 2016.
- [14] Din I, Anwar H, Syed I, Zafar H, Hasan L. Projector Cali-

- bration for Pattern Projection Systems[J]. *Journal of Applied Research and Technology*, 2014, 12(1):80-86.
- [15] Yamazaki S, Mochimaru M, Kanade T. Simultaneous self-calibration of a projector and a camera using structured light[C]//*Cvpr Workshops*. IEEE, 2011.
- [16] Sajadi B, Tehrani M A, Rahimzadeh M, et al. High-resolution lighting of 3D reliefs using a network of projectors and cameras [C]//2015 3DTV-Conference: The True Vision-Capture, Transmission and Display of 3D Video (3DTV-CON 2015). IEEE, 2015.
- [17] Garcia R R, Zakhor A. Geometric calibration for a multi-camera-projector system[C]//*Applications of Computer Vision (WACV)*, 2013 IEEE Workshop on. IEEE, 2013.
- [18] Garrido-Jurado S, Munoz-Salinas R, Madrid-Cuevas F J, et al. Simultaneous reconstruction and calibration for multi-view structured light scanning[J]. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2016, 39:120-131.
- [19] Francis, Li, Hicham, et al. Simultaneous Projector-Camera Self-Calibration for Three-Dimensional Reconstruction and Projection Mapping[J]. *IEEE Transactions on Computational Imaging*, 2017, 3(1):74-83.
- [20] Resch C, Naik H, Keitler P, et al. On-Site Semi-Automatic Calibration and Registration of a Projector-Camera System Using Arbitrary Objects with Known Geometry [J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2015, 21(11):1211-1220.
- [21] Willi S, Grundhofer A. Robust Geometric Self-Calibration of Generic Multi-Projector Camera Systems [C]//*IEEE International Symposium on Mixed & Augmented Reality*. IEEE Computer Society, 2017.
- [22] Asayama H, Iwai D, Sato K. Fabricating Diminishable Visual Markers for Geometric Registration in Projection Mapping[J]. 2018.
- [23] Kitajima Y, Iwai D and Sato K, Simultaneous Projection and Positioning of Laser Projector Pixels[J]. in *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2017.
- [24] Resch C, Keitler P, Klinker G. Sticky projections — A new approach to interactive shader lamp tracking[C]//2014 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR). IEEE, 2014.
- [25] Siegl C, Colaianni M, Thies L, et al. Real-time pixel luminance optimization for dynamic multi-projection mapping[J]. *Acm Transactions on Graphics*, 2015, 34(6cd):1-11.
- [26] Hashimoto N, Koizumi R, Kobayashi D. Dynamic Projection Mapping with a Single IR Camera[J]. *International Journal of Computer Games Technology*.2017: 1-10.
- [27] Lincoln P, Welch G, Fuchs H. Continual surface-based multi-projector blending for moving objects[C]. *IEEE Virtual Reality Conference, VR 2011*. IEEE, 2011.
- [28] Bermanno A, P Bruschweiler, Grundh Fer A, et al. Augmenting physical avatars using projector-based illumination[J]. *Acm Transactions on Graphics*, 2013, 32(6):1-10.
- [29] Watanabe Y, Kato T, Ishikawa M. Extended Dot Cluster Marker for High-speed 3D Tracking in Dynamic Projection Mapping[C]//2017 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR). IEEE, 2017.
- [30] Nomoto T, Koishihara R, Watanabe Y. Realistic Dynamic Projection Mapping Using Real-Time Ray Tracing [C]. *SIGGRAPH '20: Special Interest Group on Computer Graphics and Interactive Techniques Conference*, 2020.
- [31] Kiyokawa M, Okuda S, Hashimoto N. Stealth Projection: Visually Removing Projectors from Dynamic Projection Mapping[C]. *SIGGRAPH Asia 2019 Posters*, 2019.
- [32] Punpongsanon P, Iwai D, Sato K. Projection-based visualization of tangential deformation of nonrigid surface by deformation estimation using infrared texture[J]. *Virtual Reality* 19, 2015.
- [33] Narita G, Watanabe Y, Ishikawa M. Dynamic projection mapping onto a deformable object with occlusion based on high-speed tracking of dot marker array[C]//*Acm Symposium on Virtual Reality Software & Technology*. ACM, 2015.
- [34] Fujimoto Y, Smith R T, Taketomi T, et al. Geometrically-Correct Projection-Based Texture Mapping onto a Deformable Object[J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2014.
- [35] Narita G, Watanabe Y, Ishikawa M. Dynamic Projection Mapping onto Deforming Non-Rigid Surface Using Deformable Dot Cluster Marker [J]. *IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics*, 2017.
- [36] Bermanno A H, Billeter M, Iwai D, et al. Makeup Lamps: Live Augmentation of Human Faces via Projection[J]. *Computer Graphics Forum*, 2017, 36(2):311-323.
- [37] Siegl C, Lange V, Stamminger M, et al. FaceForge: Markerless Non-Rigid Face Multi-Projection Mapping [J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2017, 23(11): 2440-2446.
- [38] Ahmed B, Lee K H. Projection mapping onto deformable nonrigid surfaces using adaptive selection of fiducials [J]. *Journal of electronic imaging*, 2019, 28(6): 063008.1-063008.16.
- [39] Miyashita L, Watanabe Y, Ishikawa M. MIDAS Projection: Markerless and Modelless Dynamic Projection Mapping for Material Representation[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2018, 37(6):196.1-196.12.

- [40] Gomes A, Fernandes K, Wang D. Surface Prediction for Spatial Augmented Reality Applications[J]. *Virtual Reality* 25, 2021.
- [41] Sueyoshi T, Morimoto Y. Tangible Projection Mapping onto Deformable Moving Thin Plants via Markerless Tracking[C]//The Adjunct Publication of the 32nd Annual ACM Symposium. ACM, 2019.
- [42] Nayar S K. A Projection System with Radiometric Compensation for Screen Imperfections[C]. *Proc Iccv Workshop on Projector-camera Systems*, 2003.
- [43] Law A J, Aliaga D G, Sajadi B, et al. Perceptually Based Appearance Modification for Compliant Appearance Editing [J]. *Computer Graphics Forum*, 2011, 30(8):2288-2300.
- [44] Menk C, Koch R. Physically-based augmentation of real objects with virtual content under the influence of ambient light [C]//*Computer Vision & Pattern Recognition Workshops*. IEEE, 2010.
- [45] Christoffer, Menk, Reinhard, et al. Truthful Color Reproduction in Spatial Augmented Reality Applications[J]. *IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics*, 2013.
- [46] A Grundhöfer. Practical Non-linear Photometric Projector Compensation[C]//*Computer Vision & Pattern Recognition Workshops*. IEEE, 2013.
- [47] Grundhöfer A, Iwai D. Robust, Error-Tolerant Photometric Projector Compensation [J]. *IEEE Transactions on Image Processing A Publication of the IEEE Signal Processing Society*, 2015, 24(12):5086.
- [48] Mihara, Shoichiro, Iwai, et al. Artifact Reduction in Radiometric Compensation of Projector-Camera Systems for Steep Reflectance Variations.[J]. *IEEE Transactions on Circuits & Systems for Video Technology*, 2014, 24(9):1631-1638.
- [49] Law A J, Aliaga D G, Majumder A. Projector placement planning for high quality visualizations on realworld colored objects[J]. 2013.
- [50] Li D, Xie J, Zhao L, et al. Multi-projector auto-calibration and placement optimization for non-planar surfaces[J]. *Optical Review*, 2015, 22(5):762-778.
- [51] Hashimoto N, Yoshimura K. Radiometric compensation for non-rigid surfaces by continuously estimating inter-pixel correspondence[J]. *The Visual Computer*, 2021, 37(1).
- [52] Bimber O. Compensating indirect scattering for immersive and semi-immersive projection displays[J]. *Proc Virtual Reality*, 2006:151-158.
- [53] Christian, Siegl, Matteo, et al. Adaptive stray-light compensation in dynamic multi-projection mapping [J]. *Computational Visual Media*, 2017, 3(3):263-271.
- [54] Takeda S, Iwai D and Sato K. Inter-reflection Compensation of Immersive Projection Display by Spatio-Temporal Screen Reflectance Modulation [J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2016.
- [55] Amano T, Kato H. Appearance Control Using Projection with Model Predictive Control[C]//*International Conference on Pattern Recognition*. IEEE Computer Society, 2010.
- [56] Amano T. Projection Center Calibration for a Co-located Projector Camera System[C]. IEEE, 2014.
- [57] Amano T. Projection Based Real-Time Material Appearance Manipulation[C]. IEEE Computer Society, 2013.
- [58] Oliver, Bimber, Daniel, et al. Closed-Loop Feedback Illumination for Optical Inverse Tone-Mapping in Light Microscopy.[J]. *IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics*, 2011.
- [59] Amano T. Shading illusion: A novel way for 3-D representation on paper media[C]//*IEEE Computer Society Conference on Computer Vision & Pattern Recognition Workshops*. IEEE, 2012.
- [60] Amano T, Shimana I, Ushida S, et al. Successive Wide Viewing Angle Appearance Manipulation with Dual Projector Camera Systems[C]. *International Conference on Artificial Reality & Telexistence & the Eurographics Symposium on Virtual Environments*. Eurographics Association, 2014.
- [61] Tsukamoto J, Iwai D, Kashima K. Radiometric Compensation for Cooperative Distributed Multi-Projection System Through 2-DOF Distributed Control [J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2015, 21(11):1-1.
- [62] Huang B, Ling H. End-to-end Projector Photometric Compensation: IEEE, 10.1109/CVPR.2019.00697[P]. 2019.
- [63] Pjanic P, Willi S, Iwai D, et al. Seamless Multi-Projection Revisited[J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2018, PP(99):1-1.
- [64] Li Y, Majumder A, Gopi M, et al. Practical Radiometric Compensation for Projection Display on Textured Surfaces using a Multidimensional Model [J]. *Computer Graphics Forum*, 2018, 37(2):365-375.
- [65] Kageyama Y, Isogawa M, Iwai D, et al. ProDebNet: Projector Deblurring using Convolutional Neural Network[J]. *Optics Express*, 2020, 28(14).
- [66] Damberg G, Ballestad A, Kozak E, et al. High brightness HDR projection using dynamic phase modulation [C]//*ACM SIGGRAPH 2015 Emerging Technologies*. ACM, 2015.
- [67] Bimber O, Iwai D, Wetzstein G, et al. The Visual Computing of Projector-Camera Systems[J]. *Computer Graphics Forum*, 2008, 27(8):2219-2245.
- [68] Hirsch M, Wetzstein G, Raskar R. A compressive light field projection system[J]. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*

- Proceedings of ACM SIGGRAPH 2014, 2014, 33(4).
- [69] Jones B R, Sodhi R, Budhiraja P, et al. Projectibles: Optimizing Surface Color For Projection [C]//the 28th Annual ACM Symposium. ACM, 2015.
- [70] Iwai D, Takeda S, Hino N, et al. Projection screen reflectance control for high contrast display using photochromic compounds and UV LEDs[J]. Optics Express, 2014, 22(11):13492.
- [71] Metzler C A, Ikoma H, Peng Y, et al. Deep Optics for Single-Shot High-Dynamic-Range Imaging[J]. IEEE, 2020.
- [72] Watanabe Y, Narita G, Tatsuno S, et al. High-speed 8-bit Image Projector at 1, 000 fps with 3 ms Delay [C]//The International Display Workshops. 2015.
- [73] Regan M, Miller G. The Problem of Persistence with Rotating Displays[J]. IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics, 2017, PP(4):1-1.
- [74] Xu H, Wang L, Tabata S, et al. Extended depth-of-field projection method using a high-speed projector with a synchronized oscillating variable-focus lens[J]. Applied Optics, 2021.
- [75] Majumder A, Brown M S. Practical Multi-Projector Display Design[M]. 2007.
- [76] Iwai D, Kodama K, Sato K. Reducing Motion Blur Artifact of Foveal Projection for a Dynamic Focus-Plus-Context Display [J]. Circuits & Systems for Video Technology IEEE Transactions on, 2015, 25(4):547-556.
- [77] Aliaga D G, Yeung Y H, Law A, et al. Fast high-resolution appearance editing using superimposed projections [J]. Acm Transactions on Graphics, 2012, 31(2):1-13.
- [78] Allen W, Ulichney R. Wobulation: Doubling the Addressed Resolution of Projection Displays [J]. SID International Symposium: Digest of Technology Papers, 2005(2):36.
- [79] 4K UHD display chip sub-system Reference Design featuring DLP660TE and DLPC4422.
- [80] TI DLP 4K Ultra High Definition (UHD) Display Chipset.
- [81] UHD60 -4K Ultra High Definition Home Theater Projector.
- [82] Sajadi B, Qoc-Lai D, Ihler A H, et al. Image enhancement in projectors via optical pixel shift and overlay [C]//IEEE International Conference on Computational Photography. IEEE, 2013.
- [83] Sajadi B, Gopi M, Majumder A. Edge-guided resolution enhancement in projectors via optical pixel sharing[J]. Acm Transactions on Graphics, 2012, 31(4):1-122.
- [84] Brown M S, Peng S, Cham T J. Image Pre-Conditioning for Out-of-Focus Projector Blur [C]//IEEE Computer Society Conference on Computer Vision & Pattern Recognition. IEEE, 2006.
- [85] Ma C, Suo J, Dai Q, et al. High-rank coded aperture projection for extended depth of field[C]//IEEE International Conference on Computational Photography (ICCP). IEEE, 2013.
- [86] Iwai D, Mihara S, Sato K. Extended Depth-of-Field Projector by Fast Focal Sweep Projection [J]. IEEE transactions on visualization and computer graphics, 2015(4):21.
- [87] Bimber O, Emmerling A. Multifocal projection: a multiprojector technique for increasing focal depth.[J]. IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics, 2006, 12(4):658.
- [88] Nagase M, Iwai D, Sato K. Dynamic defocus and occlusion compensation of projected imagery by model-based optimal projector selection in multi-projection environment[J]. Virtual Reality 15, 2011.
- [89] Nakamura T, Horisaki R, Tanida J. Computational superposition projector for extended depth of field and field of view [J]. Optics Letters, 2013, 38(9):1560-1562.
- [90] Ajito T, Obi T, Yamaguchi M, Ohyama N. Multiprimary color display for liquid crystal display projectors using diffraction grating[J]. Optical Engineering, 38(11), 1999.
- [91] Ajito T, Obi T, Yamaguchi M, et al. Expanded color gamut reproduced by six-primary projection display [J]. Proc Spie, 2000, 3954:130-137.
- [92] Hirai K, Irie D, Horiuchi T. Multi-primary image projector using programmable spectral light source[J]. Journal of the Society for Information Display, 2016, 24(1-3):144-153.
- [93] Kauvar I, Yang S J, Liang S, et al. Adaptive color display via perceptually-driven factored spectral projection [J]. ACM Transactions on Graphics, 2015, 34(6cd):1-10.
- [94] Yong Y L, Lee J H, Ahmed B, et al. A New Projection-based Exhibition System for a Museum[J]. Journal on Computing and Cultural Heritage (JOCCH), 2019, 12(2):1-17.
- [95] Hiratani K, Iwai D, Punpongson P, et al. Shadowless Projector: Suppressing Shadows in Projection Mapping with Micro Mirror Array Plate [C]//2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR). IEEE, 2019.
- [96] Nomoto T, Li W, Peng H, et al. Dynamic Projection Mapping with Networked Multi-projectors Based on Pixel-parallel Intensity Control [C]//SA '20: SIGGRAPH Asia 2020. 2020.