

激光与光电子学进展

基于光转向的高动态范围激光显示

赵鹏^{1,2}, 余新², 杨亚涛^{1*}

¹深圳大学电子与信息工程学院, 广东 深圳 518060;

²深圳光峰科技股份有限公司, 广东 深圳 518060

摘要 广色域(WCG)和高动态范围(HDR)显示能够真实地还原现实场景,是高性能显示力求实现的方向。基于相位调制的光转向器件可以改变光场的能量分布,采用了光转向技术的激光显示系统兼具 WCG 和 HDR 特性,具有优良的显示效果。在影院、投影增强现实等对显示效果要求高的使用场景中有广泛的应用前景。动态范围的拓展能力依赖于光转向照明调制的算法,基于此,提出了一种新的光转向调制算法,利用自由曲面透镜对光束的偏折和聚散对光转向器件进行算法建模,采用迭代算法实现相位分布的计算,并使用线性化、离散傅里叶变换等方法提高算法速度。仿真结果表明,通过光转向调制,所提算法能够 10 倍地提高画面的最高亮度,实现 10 倍以上的动态范围提升。

关键词 测量; 高动态范围; 激光显示; 光转向; 相位空间光调制器

中图分类号 O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0512002

High Dynamic Range Laser Display Based on Light Steering

Zhao Peng^{1,2}, Yu Xin², Yang Yatao^{1*}

¹College of Electronics and Information Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China;

²Appotronics Corporation Ltd., Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China

Abstract Wide color gamut (WCG) and high dynamic range (HDR) display can truly replicate a real scene in a high-performance display. Light steering device based on phase modulation can change the energy distribution of a light field; thus, remarkable display performance can be realized using WCG and HDR in a display system comprising laser source and light steering technology. Light steering technology can be applied in situations demanding high performance, including cinema display and projection augmented reality. The ability to expand the dynamic range depends on the light steering modulation algorithm. Based on this, a new light steering modulation algorithm is proposed. A free-form surface lens is used to model the light steering device, the iterative algorithm is used to calculate the phase distribution, and the linearization and discrete Fourier transform are used to improve the algorithm speed. Simulation results show that the proposed algorithm can improve the maximum brightness of a picture by 10-fold and achieve more than 10 times the dynamic range via light steering modulation.

Key words measurement; high dynamic range; laser display; light steering; phase spatial light modulator

收稿日期: 2021-03-25; 修回日期: 2021-04-19; 录用日期: 2021-06-10

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB0406800)、广东省重点领域研发计划(2019B010926001)、广东省省级科技计划(2018B030323014)

通信作者: *yatao86@szu.edu.cn

1 引言

动态范围是指场景中最亮部分与最暗部分的亮度比值,人眼可以捕获 100000:1 动态范围^[1]场景中的特征,大自然真实场景的动态范围更是高达 10^8 :1。但目前显示设备[手机、电视、投影、augmented reality (AR)设备等]的动态范围往往按照 100:1~1000:1 的低动态范围(LDR)标准来构建,比真实世界的亮度范围小数个量级,远达不到人类视觉系统的标准。高动态范围(HDR)可以完整地保留亮部与暗部的细节,同时保证明暗灰阶过渡自然,是目前图像领域的研究热点^[2-3]。除了动态范围,显示设备能够提供的色域表现和最高亮度等也是影响显示效果的重要因素,最新的 HDR 显示标准对色域和最高亮度也提出了严格的要求。激光具有良好的单色性,可以提供较广的显示色域^[4-5]。综合来看,激光 HDR 显示有潜力能够从色彩和亮度上忠实地还原场景画面^[6-7],是未来显示技术的发展方向。

对实现激光 HDR 显示的尝试主要有激光扫描方案^[8-9]、双片调制器方案^[10]、动态分区调光方案^[11-13]和光转向照明调制方案^[14]。

采用激光扫描方案的代表公司是美国 MicroVision,该方案使用准直激光照射在高速振动的微机电系统(MEMS)振镜上,振镜对光束的偏转会扫描出显示区域,通过对激光器的开关实现显示内容的调制,但这种方案需要单模激光器和高速 MEMS,成本较高,也很难实现高亮度、高分辨率、高位深的显示效果。双片调制器方案的代表公司是美国的 Dolby Laboratories,在单片空间光调制器(SLM)动态范围受限的情况下,两个空间光调制器级联的方案可获得更纯净的暗场表现,但整体的能效利用较低,画面能够实现最高亮度也大幅下降。动态分区调光方案将照明光进行分区并实现动态调控,最终的显示效果依赖于能够独立控制的分区数量,由于目前的激光光源仍然较为昂贵,实现成千上万分区的激光 HDR 显示条件尚不成熟。

利用特定的光转向器件对照明光进行动态调制,根据显示内容动态地分配照明光的能量,可以使画面中的高亮区域获得更高的照明亮度,实现高亮度显示,同时也会使画面中的暗部照明亮度下降,得到更纯净的暗场显示表现,进而实现 HDR 显示效果。由于可以使用无损器件对照明光进行调制,光转向技术在高亮度、高位深等性能上都有很

好的表现。来自加拿大的 MTT Innovation 公司利用光转向 HDR 技术搭建了实际的系统,并进行了相关的实验论证,实验结果表明,光转向技术^[14]确实可以获得更好的显示效果。但光转向方案的实现效果强烈地依赖于光转向调制算法,此前的工作在峰值亮度等方面依然存在改善的空间。

本文提出了一种基于光转向技术实现 HDR 显示的方法。首先,通过使用相位 SLM 模拟自由曲面透镜,可以对照明光实现光转向调制;其次,提出一种从待显示内容计算相位 SLM 对应相位调制的方法,并使用线性化、离散傅里叶变换加速等方法进行优化。仿真结果表明,所提方法可以将显示亮度提高 10 倍以上,大幅度提高显示效果,亮度的增幅倍数是目前已知报道方案中的较高水平。

2 光转向实现 HDR 显示

2.1 光转向技术原理

光束的相位分布决定了光束的传播方向,使用相位空间光调制器对光束的波前进行调制可以控制光束的转向方向,在不同区域处使用不同的相位调制可以控制光束产生复杂的偏向作用,进而产生特定明暗分布的调制效果。并且由于光转向具有无损的优点,这种调制是高效的,使得调制后的最高亮度可以大大超过光束原本的亮度。

传统的激光显示采用一个均匀的照明光配合一个强度调制 SLM 产生图像,而基于光转向技术的 HDR 显示引入一个额外的相位 SLM 实现光转向,对均匀照明光进行强度分布的调制,使得光的能量分布大致与图像内容相符,再通过一个强度调制 SLM 对光束进行更细致的调制,从而产生最终的显示画面,如图 1 所示。光转向提供了无损的光强度

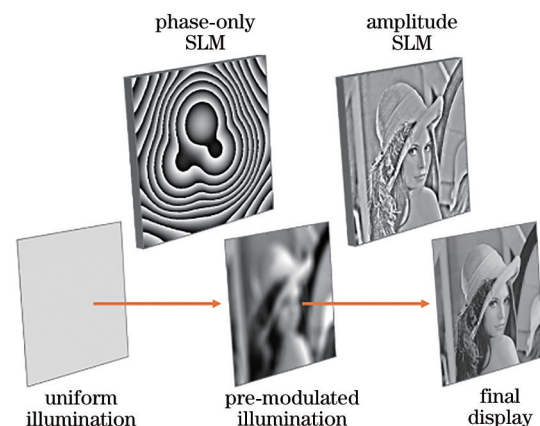


图1 基于光转向技术的 HDR 显示

Fig. 1 HDR display based on light steering technology

分布调制,经过预调制的照明光具有更高的最高亮度和更低的最低亮度,拓展了照明光自身的动态范围,进而实现高动态范围显示。

2.2 光转向计算方法

光转向 HDR 激光显示的核心是光转向亮度调控算法。待显示画面内容决定了光转向技术需要实现的亮度调控,根据待显示画面计算光转向调控相位分布的算法需要具有快速、准确的特点。图 2 为光转向技术实现照明调控的示意图,相位平面处,通过相位 SLM 产生一定的相位分布,光束经过该平面后被调制,产生转向作用,经过一定距离 f 后,在光场平面处产生一定明暗的分布。

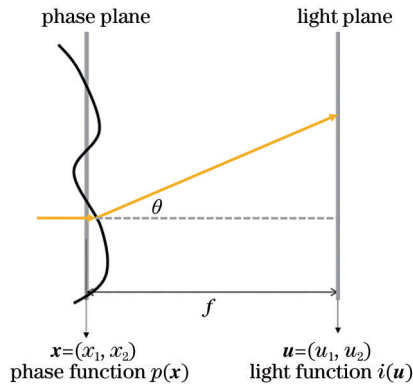


图 2 光转向照明调控

Fig. 2 illumination modulation by light steering

假定相位平面的相位(以光程大小表示)分布和光场平面的亮度分布分别为 $p(\mathbf{x})$ 和 $i(\mathbf{u})$, 其中 $\mathbf{x} = (x_1, x_2)$, $\mathbf{u} = (u_1, u_2)$ 分别是相位平面和光场平面的坐标。

光束沿水平方向入射在相位平面上,产生的偏转角度与相位的梯度有关,即

$$\sin \theta = \frac{\Delta p}{\Delta x} \quad (1)$$

从 $\mathbf{x} = (x_1, x_2)$ 出发经过偏转的光线落在 $\mathbf{u} = (u_1, u_2)$ 处,两者的映射关系为

$$u_i = x_i + f \cdot \tan \theta_i \quad (2)$$

在小角近似下,有 $\sin \theta \approx \tan \theta \approx \theta$, 则光线在两个平面上的映射关系可以表达为

$$\mathbf{u} = \mathbf{x} + f \cdot \nabla p(\mathbf{x}) \quad (3)$$

相位平面处的相位起伏梯度决定了光束的偏转角度,而相位起伏的二阶导数则确定了等相位面的曲率,决定了相位平面对光束的汇聚和发散的调控程度。一个焦距为 L_0 的透镜相位分布可以近似

表达为 $p(x) = -\frac{1}{2} \frac{x^2}{L_0}$, 光束经过此透镜后,在前方 f 距离处,光束的光强 i 相较于入射光光强 i_0 关系为

$$\frac{i}{i_0} = \left(\frac{L_0}{L_0 - f} \right)^2$$

因此,当相位平面的相位分布 $p(\mathbf{x})$ 已知时,在光场平面处对应位置上的光强被调制为

$$\frac{i}{i_0} = \frac{1}{\left[1 + f \cdot \frac{\partial^2 p(\mathbf{x})}{\partial x_1^2} \right] \left[1 + f \cdot \frac{\partial^2 p(\mathbf{x})}{\partial x_2^2} \right]} \quad (4)$$

(4)式提供了亮度分布和相位分布之间的计算模型,光转向算法需要解决的问题是从目标亮度分布中得到相位平面所需要实现的相位调制,通过此模型可以进行求解。但值得注意的是,此时的光强分布是在相位平面的坐标系 \mathbf{x} 下表达的,想要获得直观的亮度分布还需要结合两个平面的映射关系。因此若想通过(4)式的模型求解得到准确的相位分布,需要先将亮度分布从以 \mathbf{u} 为坐标的分布 $i(\mathbf{u})$ 映射回以 \mathbf{x} 为坐标的分布 $i_p(\mathbf{x})$ 。

由于目标的亮度分布只含有强度信息,而丢失了全部的光场相位信息,因此从目标的亮度分布中获得两个坐标之间的映射关系是较困难的,通过预设相位分布 $p(\mathbf{x})$ 计算映射关系,再进行迭代是一个可行的方法。

光转向照明调控具体计算流程如图 3 所示。首

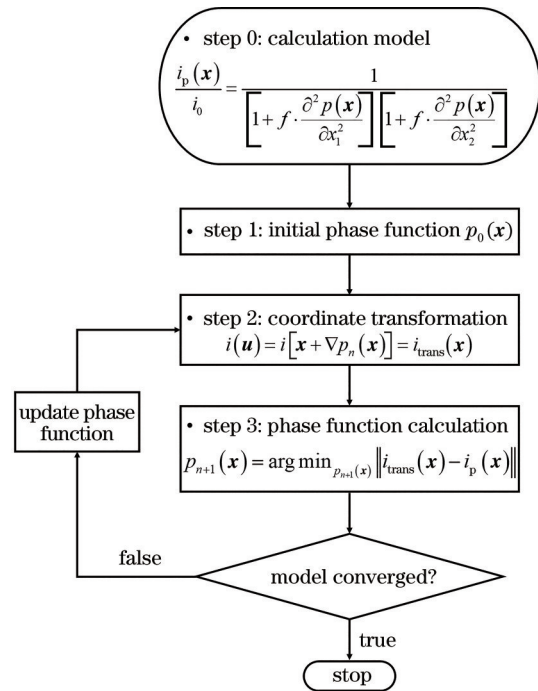


图 3 光转向照明调控计算流程

Fig. 3 Calculation flow of light steering modulation

2.4 图像预处理及效果评估方法

考虑到图片的编码值与亮度值存在伽马变换关系,图片的边缘需要引入额外的填充提高算法鲁棒性,在图片进入到光转向计算流程前,需要对图像进行一定的预处理。此外,使用光转向算法获得了亮度调制后,需要引入定量的评估方法。此小节讨论对图像的预处理和处理效果的量化方法。

对图像的预处理主要包括伽马变换和边缘填充。伽马变换采用了 sRGB 规范下的变换,从归一化的编码值映射到归一化的亮度值。考虑到彩色图片的三色亮度分布各不相同,在实际应用中三色分量需要对应三种不同的光转向调制。为了简便起见,本实验组使用了图片的黑白亮度作为最终的测试样例。

由于光转向算法不对图像边界进行处理,若不对图像进行边缘填充预处理,画面的边缘会存在一定的扭曲,导致照明光出现缺失。为了增加图片边缘处的鲁棒性,对图片的亮度分布进行了边缘的镜像填充,如图 4 所示,图 4(a)为 Lenna 照片的原图,图 4(b)为边缘填充后的图像,在图片的上下左右都镜像地填充了原始图片的一部分。填充的比例可以在一定范围内进行选取,图像的边缘填充比例越高,图像边缘的扭曲现象越轻微,降低填充比例可以提高计算速度,同时也会带来鲁棒性的下降。由于本实验的讨论重点是算法的亮度增强效果,填充原图的一半来确保算法效果的鲁棒性。实际上当边缘填充比例达到 10% 之后,仿真样例边缘已不再出现失效的情况,在实际的应用中可以适当缩小填充比例来提高每帧的生成速度。



图 4 Lenna 图像边缘镜像填充。(a)填充前;(b)填充后
Fig. 4 Mirror padding of Lenna picture. (a) Before padding; (b) after padding

将图片引入到光转向算法后,可以计算出经过调制后的照明亮度分布,本实验组使用经调制后的照明高亮区域被增亮的倍数来评估光转向算法的

性能。针对输入的图片样例,首先选取亮度值大于 95% 亮度最大值的部分作为高亮区域,计算经调制后在高亮区域内的照明亮度的平均值,该平均值与原本均匀照明光的亮度值比值就是调制后亮度被增强的倍数,使用此“亮度倍数”量化光转向算法的性能。

“亮度倍数”的意义在于,对于同一套显示系统,有无光转向技术时显示画面的最高亮度的提高倍数。以投影显示系统为例,显示画面的最高亮度受到 SLM 照明光的最高亮度的制约。传统的显示方案中,照明光在 SLM 各处亮度均匀分布,图像的暗部区域处的照明光白白浪费了,光转向技术采用无损的相位调制方法,可以在不改变照明光的能量总量的情况下,动态分布照明光的亮度分布,让能量向部分区域集中,这可以使得照明光的最高亮度远超未采用光转向技术时的亮度。由于照明光最高亮度的提高,对同一套显示系统而言,最终画面的最高亮度也相应得提高了。

3 光转向高动态范围显示效果分析

图 5 为光转向算法对不同图片的计算结果,从左到右分别是不同图片样例对应的仿真结果,图片样例分别是 Lenna 图片、几何图片和闪电图片,其中几何图片是用电脑生成的,闪电图片是作者拍摄的,从上至下分别是图片样例的原图、经过光转向调制的照明分布(以原始亮度归一化)、经过光转向调制的照明分布(以调制后最大亮度归一化)、计算得到的相位函数分布和用于反映迭代收敛速度的相位分布函数差值。图片样例的分辨率为 512×512 ,假定采用与其分辨率一致的相位 SLM,SLM 单个像素的尺寸为 $8 \mu\text{m}$,工作波长设定为 532 nm ,调制后的光场平面与相位平面的距离 $f=25 \text{ cm}$ 。需要说明的是,从相位分布函数计算得到亮度调制效果时,采用了(4)式的非简化透镜模型,得到的仿真结果不依赖于计算相位分布函数时所采用的线性化近似方法。

经过光转向器件调制后,照明光的亮度分布明显按照图像内容进行了重新分布,在图像亮度较高的区域,照明光的亮度超过了原始值,而在图片的暗区,照明亮度则小于原始值,提高了显示的动态范围。图片最高亮度范围附近的亮度也有所增强,如图 5 中几何图形样例,在圆形光斑的上方和三角、正方形的左右方都出现了高亮的光条,这是模型的

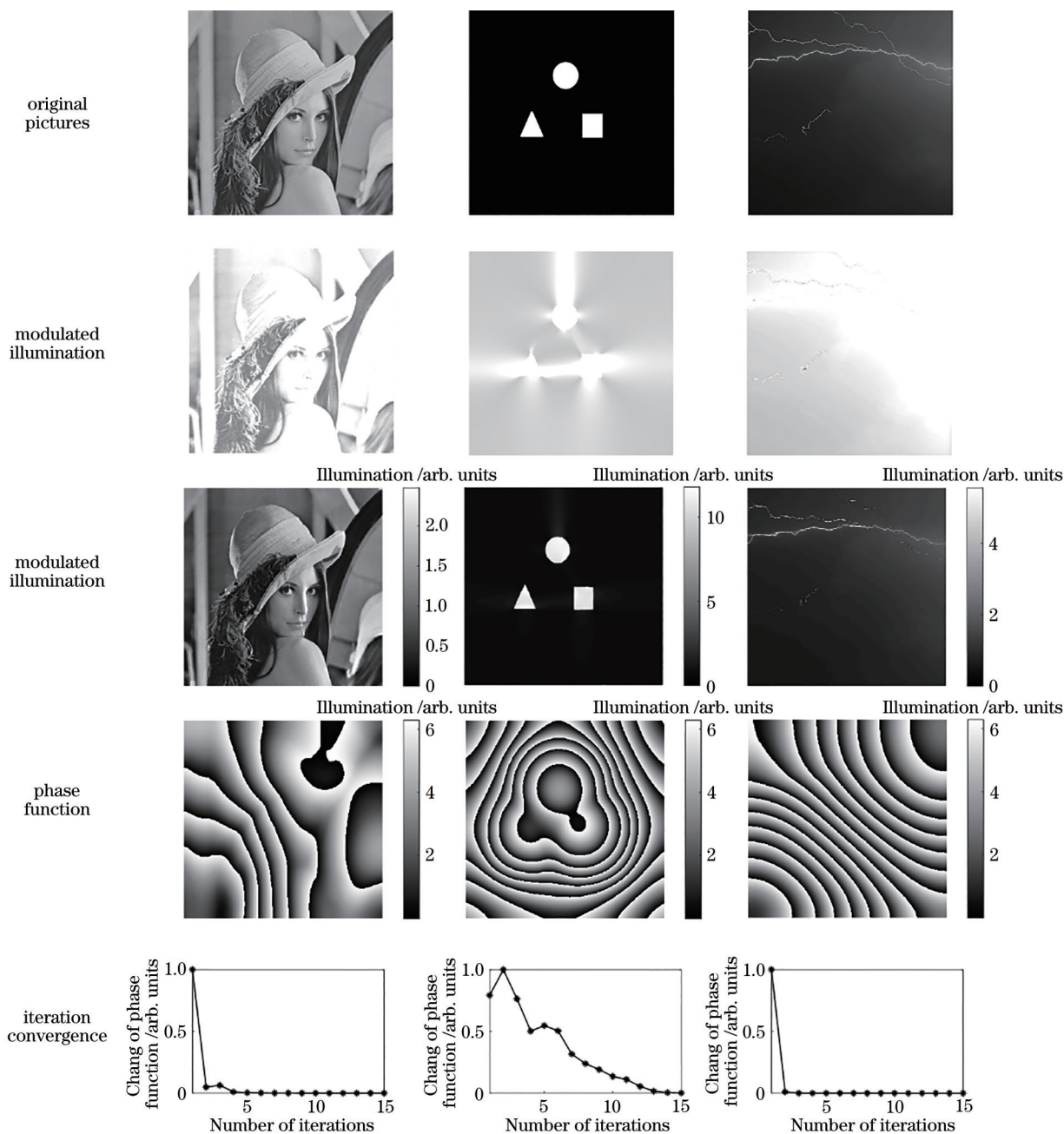


图5 光转向算法仿真结果

Fig. 5 Simulation results of light steering algorithm

线性化近似引入了一定的误差导致的。

仿真结果表明,光转向技术可以将最高亮度提升10倍以上,最高亮度的提升倍数与图片内容本身有关,在例如闪电这类背景较黑,主体亮度显著的图片上,光转向技术可以获得超高的亮度提升倍数,让现实效果更具震撼感。经过调制的亮度分布与目标图像形貌十分接近,在图片细节上存在一定模糊,考虑到相位SLM会导致一定的相位失真,并且由于光源相干性强、像素尺寸小,最终的调制效果还会受到衍射效应的影响,最终产生的亮度调制

丢失了更多细节,仍需要一个强度SLM与之配合从而产生最终的画面。

由于采用自由曲面透镜模型模拟相位函数对光线的作用,最终计算得到的相位函数接近自由曲面透镜的形貌,也就是相位连续变化,这与常规的全息相位调制有所不同,除了可以使用相位SLM实现外,还可以采用可变性反射镜等类似的器件实现类似的效果,实现光转向效果的器件有更多的选项。值得说明的是,光转向HDR技术使用了相位调制技术,全息显示领域此前的研究表明,这种相

位产生强度调制的方法往往受到噪声的困扰,会在产生的画面主体上叠加上一层噪点,影响图像的画质。相较于全息显示,所提相位调制器模拟了自由曲面,空间相位分布呈现出平滑变化的趋势,产生的噪声问题较轻微,在实践中也有多种方法可以进一步规避噪声所带来的问题。由于相位模拟了自由曲面,相位平面与光场平面具有局域的映射关系,如图 6(a)所示,若照明光只覆盖相位平面的一部分,则在光场平面得到的分布也只含有一部分,而对于常规的全息调制,如图 6(b)所示,即使照明光只覆盖相位平面一部分时,光场平面得到的分布依然会基本覆盖整个平面,因此基于自由曲面透镜的光转向技术对光源的空间相干性要求更低,并且调制产生的亮度分布对波长的敏感性不高,也可以采用全息显示领域中常见的降低光源相干性的方法降低噪声。

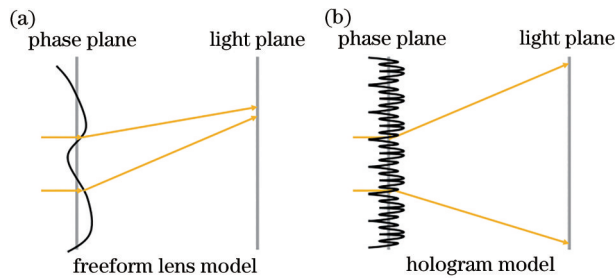


图 6 自由曲面与常规全息相位调制。(a)自由曲面模型; (b)全息模型

Fig. 6 Phase modulation based on freeform lens model and common hologram model. (a) Freeform lens model; (b) hologram model

其次,光转向技术中强度 SLM 会配合相位 SLM 一同产生图像,相位 SLM 实现的调制不需要实现图像中的细节,因此可以在相位 SLM 的调制照明之后引入一个弱散射片,散射片会进一步模糊图像细节,同时也会平滑全息调制中产生的噪声,使得噪声从会影响观感的点状扩散为大区域的平缓分布的背景亮度,这些背景亮度可以使用强度空间光调制器进一步修正,从而消除噪声现象,如图 7 所示。

由于采用了迭代的计算方法,迭代所需要的次数对运算时间有很大的影响,图 5 最下方给出了所提方法迭代收敛的情况,每次计算相位分布函数的迭代结果与上一轮结果的差异 $\|p_{n+1}(\mathbf{x}) - p_n(\mathbf{x})\|$,图 5 给出了迭代 15 次对应的结果。从图中可以看出,不同图片的迭代速度有所不同,对于边缘较为

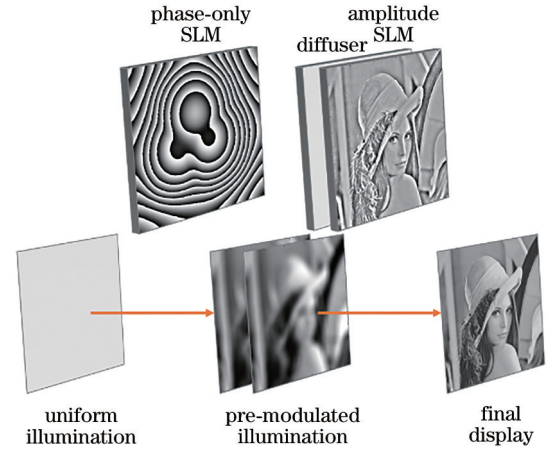


图 7 添加散射片的光转向 HDR 显示

Fig. 7 HDR display based on light steering technology with diffuser

锐利的图片,收敛速度相对缓慢,对于 Lenna 和闪电图片,从 5 次迭代后,相位分布函数的迭代变化已经变得很小,基本完成了收敛。在仿真中发现,对于大部分图片样例,可以选取 5~10 次作为每张待显示画面计算时的迭代次数。

光转向的计算结果与计算时采用的阻尼因子相关,阻尼因子 γ 和 α 会影响光转向技术的计算结果,合适的阻尼因子可以使得计算结果收敛较快,且亮度调制与目标亮度分布较为一致,失真较小。在一定范围内,阻尼因子对最终结算结果影响不大,对于不同的图片,最佳的阻尼因子有一些差异。表 1 中总结了不同图片样例计算时采用的参数。此外,在 CPU 型号为 i7-9750H, GPU 型号为 GTX1650 的笔记本电脑上进行了仿真运算,表 1 中还整理了进行 15 次迭代运算时,在 CPU 和 GPU 上进行仿真时的计算时间。FFT 运算在 GPU 上的运算速度更高,因此在 GPU 上的计算时间(约 1 s)要明显短于在 CPU 上的计算时间(约 5 s)。通过降低分辨率、减少图片边缘填充比例、减少迭代次数或采用更高性能的计算平台可以进一步提高运算速度,未来有望实现 30~60 Hz 的实时运算。

表 1 光转向相位计算参数

Table 1 Parameters for calculating phase pattern of light steering

Image	Resolution	α	γ	CPU time /s	GPU time /s
Lenna	512 × 512	0.31	2 × 10 ⁹	4.5	1.1
Patterns	512 × 512	0.19	1 × 10 ⁹	5.0	1.1
Lightning	512 × 512	0.68	9 × 10 ⁸	4.5	1.1

4 结 论

光转向技术通过将照明光源的亮度分布重新分配,实现了将光能向待显示区域高亮部分集中,经过光转向调制的照明亮度分布在图像亮区更亮、暗区更暗,不仅提高了最高显示亮度,也提高了画面内的明暗对比度,相较于其他提高对比度的方案,具有能量利用效率高、可以实现更高的最高显示亮度等优点。配合激光显示具有广色域覆盖的特点,采用光转向技术的激光显示可以实现具有 WCG 和 HDR 特性的高性能显示,最大程度上提高显示效果。

本实验组采用相位 SLM 实现光转向功能,提出了一种通过目标图像计算相位分布函数的方法,具有亮度增倍高、计算速度快的优点,可以实现超过 10 倍的最高亮度增倍,512×512 分辨率图片的单帧计算时间在 CPU 上的计算时间约为 5 s,通过部署在 GPU 上提高到了 1.1 s。未来可以通过分辨率降采样、缩减迭代步数、减小边缘填充大小等方法进一步提高运算速度,实现实时演算。

参 考 文 献

- [1] Reinhard E, Heidrich W, Debevec P, et al. High dynamic range imaging: acquisition, display, and image-based lighting[M]. San Francisco: Morgan Kaufmann, 2010.
- [2] Tian H J, Hao T T, Zhang H, et al. Luminance measurement based on high dynamic range images[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(6): 061502. 田会娟, 郝甜甜, 张辉, 等. 基于高动态范围图像的亮度测量方法[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(6): 061502.
- [3] Chen X N, Zhang S F, Lei Z C. High dynamic range image generation method by fusing multi-level gamma-transformed images[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(4): 041014. 陈小楠, 张淑芳, 雷志春. 一种基于多层伽马变换融合的高动态范围图像生成方法[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(4): 041014.
- [4] Chellappan K V, Erden E, Urey H. Laser-based displays: a review[J]. Applied Optics, 2010, 49(25): F79-F98.
- [5] Zhou M X, Zhu D Q, Liao X Y. Relationship between spectrum and color gamut area of LED light sources[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(23): 232302. 周孟欣, 朱大庆, 廖欣怡. LED 光源的光谱与色域面积关系[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(23): 232302.
- [6] Peng X L, Yang C S, Deng H Q, et al. Research progress of blue-green single-frequency laser[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(7): 071606. 彭秀林, 杨昌盛, 邓华秋, 等. 蓝绿光单频激光器研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(7): 071606.
- [7] Sun M Y, Zhu J Y, Bi Y, et al. Color matching and real-time color temperature control in laser display[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(7): 0704001. 孙敏远, 朱建英, 毕勇, 等. 激光显示中颜色配比与实时色温控制研究[J]. 中国激光, 2020, 47(7): 0704001.
- [8] Urey H, Nestorovic N, Ng B S, et al. Optics designs and system MTF for laser scanning displays [J]. Proceedings of SPIE, 1999, 3689: 238-248.
- [9] Tauscher J, Davis W O, Brown D, et al. Evolution of MEMS scanning mirrors for laser projection in compact consumer electronics[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7594: 75940A.
- [10] Kusakabe Y, Kanazawa M, Nojiri Y, et al. A high-dynamic-range and high-resolution projector with dual modulation[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7241: 72410Q.
- [11] Seetzen H, Whitehead L A, Ward G. 54.2: a high dynamic range display using low and high resolution modulators[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2003, 34(1): 1450-1453.
- [12] Tan G, Huang Y, Li M C, et al. High dynamic range liquid crystal displays with a mini-LED backlight[J]. Optics Express, 2018, 26(13): 16572-16584.
- [13] Zhang T, Qiu L, Wu H Y, et al. Design and implementation of backlight module of high dynamic range video display system based on geometrical optics[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(10): 100801. 张涛, 邱亮, 巫红英, 等. 基于几何光学的高动态范围视频显示系统背光模组的设计与实现[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(10): 100801.
- [14] Damberg G, Boitard R, Ballestad A, et al. 8-3: Invited paper: Light steering projection systems and attributes for HDR displays[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2017, 48(1): 87-90.