

基于聚合物分散液晶薄膜的高分辨率光场显示研究

余毅^{1,2}, 李晖^{1,2,3*}, 许明慧¹, 吴云韬^{1,2}¹ 武汉大学计算机科学与工程学院, 湖北 武汉 430205;² 智能机器人湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430205;³ 华中科技大学化学与化工学院, 湖北 武汉 430074

摘要 基于聚合物分散液晶薄膜提出了一种新型高分辨率光场显示方法。首先,搭建虚拟相机阵列,用来对目标物体的光场信息进行采集,从而获得其元素图像阵列;然后,根据聚合物分散液晶的光电特性,通过调节聚合物分散液晶薄膜的外加电压以及利用人眼的暂留/余晖效应,可获得高分辨率的光场显示结果。实验结果表明,相较于传统方法,所提出的方法较为简便,并拥有较高的显示质量,所呈现图像的峰值信噪比提高了约 11%。另外,所提出方法搭建的系统难度小,实用性强。

关键词 成像系统; 光场显示; 元素图像阵列; 聚合物分散液晶; 计算机视觉

中图分类号 O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0711001

High Resolution Light Field Display Based on Polymer Dispersed Liquid Crystal Films

Yu Yi^{1,2}, Li Hui^{1,2,3*}, Xu Minghui¹, Wu Yuntao^{1,2}¹ School of Computer Science and Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan, Hubei 430205, China;² Hubei Key Laboratory of Intelligent Robot, Wuhan, Hubei 430205, China;³ School of Chemistry and Chemical Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract A novel high resolution light field display method based on polymer dispersed liquid crystal film is proposed. First, the virtual camera array is built to collect the light field information of the target object, so as to obtain its element image array. Then, according to the photoelectric characteristics of the polymer dispersed liquid crystal, high resolution light field display results can be obtained by adjusting the applied voltage of the polymer dispersed liquid crystal film and using the transient/afterglow effect of the human eye. The experimental results show that compared with the traditional method, the proposed method is simple and has higher display quality, and the peak signal-to-noise ratio of the presented image is improved by about 11%. In addition, the system built by the proposed method is less difficult and practical.

Key words imaging systems; light field display; element image array; polymer dispersed liquid crystal; computer vision

1 引言

光场显示技术是一种新颖的三维显示技术,可

以获取三维空间中的四维光场数据,通过透镜阵列或孔径阵列可以再现全彩三维场景^[1-4]。在非相干光照明下,光场显示技术无需特殊的眼镜设备^[5-6],

收稿日期: 2021-08-20; 修回日期: 2021-09-04; 录用日期: 2021-09-26

基金项目: 国家自然科学基金(51703071, 61771353)、湖北省自然科学基金面上项目(2019CFB553)、教育部新一代信息技术创新项目(2020ITA05049)、智能机器人湖北省重点实验室开放基金(HBIR202001)、智能机器人湖北省重点实验室 2021 年度创新基金(HBIRL202101)、苏州大学数码激光成像与显示教育部工程研究中心项目(SDGC2134)

通信作者: *lihui00317@163.com

0711001-1

就可为观赏者提供具有连续运动视差的视觉效果。目前,光场显示技术已在娱乐、工业检查、安全与国防以及生物医学等^[7-10]领域具有广泛的应用与需求。因此,国内外众多学者和研究单位对高分辨率的光场显示方法进行了较为深入的研究。

Wetzstein 等^[11]搭建了层叠式光场显示系统,该系统降低了聚焦辐辏冲突对显示带来的影响。以层叠式光场显示系统为原型,Chen 等^[12]研究了权重压缩光场显示系统,其进一步提高了光场显示系统的分辨率。上述系统利用多个平面上的像素点来确定光线的方向和位置,但在实际应用中平面的大小会限制显示范围,且层叠过多会降低系统的实用性。针对这一问题,Teng 等^[13]基于人眼的视觉暂留/余晖效应构建了时分光场显示系统,令左、右眼分别接收不同屏幕的立体图像,控制屏幕的刷新频率,可以使大量图像在人脑中合成为高分辨率的三维图像。但时分光场显示系统的遮挡方式会导致显示结果的亮度不足,且该系统只适合单用户在固定位置观看,无法实现多用户的同时观看。

此外,Geng^[14]使用微透镜阵列将显示屏图像单元发射出的光线聚焦还原,最终重建出三维图像以实现三维显示,该技术可以同时提供水平视差和垂直视差。但该技术对硬件之间的距离和硬件材料有较高的要求,且显示分辨率还有提升的空间。随着显示元件的不断革新,液晶作为一种独特的电光材料也逐渐被应用于光场显示领域^[15]。Wang 等^[16]搭建了含有可电控移动的液晶微透镜阵列的光场显示系统,该系统较好地解决了显示面板与微透镜之间没有对齐所产生的串扰问题,进一步提升了光场显示的效果。

本文将聚合物分散液晶(PDLC)薄膜与传统微透镜阵列结合,实现了一种新型光场显示系统。通

过改变 PDLC 薄膜的电压来调节其透射率,再利用人眼的暂留/余晖效应将调制前和调制后的图像信息进行融合,可形成高分辨率的三维显示结果。与传统的光场显示系统相比,本文提出的光场显示系统更加简便。对 PDLC 进行光场调制可获得视差信息连续的光场显示结果,并支持多人实时观看。此外,本文还针对传统光场显示系统亮度不足的问题,设置了外加光源来提高显示屏幕的亮度,以获得更加清晰的显示结果。另外,本文所提出的光场显示系统无需携带外置设备,裸眼便可观看到屏幕上所呈现的三维图像。

2 基本原理

2.1 光场的采集

本文提出的光场显示系统由采集模块和显示模块组成,光场显示系统的结构如图 1 所示。采集模块通过构建的虚拟相机阵列对三维物体的光场信息进行采集;显示模块能将采集到的光场信息在空间中重构出与原三维场景一致的三维图像。

设三维物体发出的光波分布为 $\psi(x, y, z; \lambda, t)$, 随着光波的传播,其信息由相机阵列记录,光波分布可表示为

$$\begin{aligned} \psi_c(x, y, z; \lambda, t) = & \sum_m^M \sum_n^N \varphi_{mn} \left(\frac{\alpha_{mn}}{\lambda}, \frac{\beta_{mn}}{\lambda}; t \right) \times \\ & \exp \left[i \frac{2\pi}{\lambda} (1 - \alpha_{mn}^2 - \beta_{mn}^2)^{\frac{1}{2}} z \right] \times \\ & \exp \left[i 2\pi \left(\frac{\alpha_{mn}}{\lambda} x + \frac{\beta_{mn}}{\lambda} y \right) \right], \quad (1) \end{aligned}$$

式中: (x, y, z) 表示任意一点的位置; λ 表示光波波长; t 表示时间; α_{mn} 和 β_{mn} 表示不同相机的拍摄角度,其中 m 和 n 分别表示相机阵列平面的横纵位置; $\exp \left[i \frac{2\pi}{\lambda} (1 - \alpha_{mn}^2 - \beta_{mn}^2)^{\frac{1}{2}} z \right]$ 表示由不同角度和距

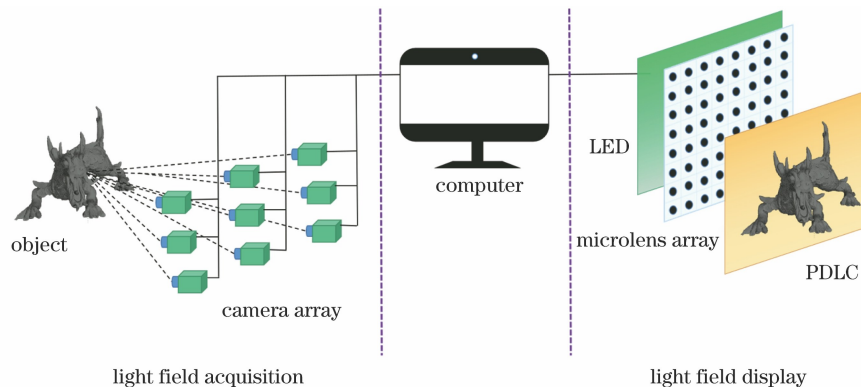


图 1 光场显示系统的结构

Fig. 1 Structure of light field display system

离产生的附加相位; $\varphi_{mn} \left(\frac{\alpha_{mn}}{\lambda}, \frac{\beta_{mn}}{\lambda}; t \right)$ 表示 α_{mn} 和 β_{mn} 角度下的角谱分布。

2.2 PDLC 薄膜

本研究使用的材料为 Merck 公司所生产的向

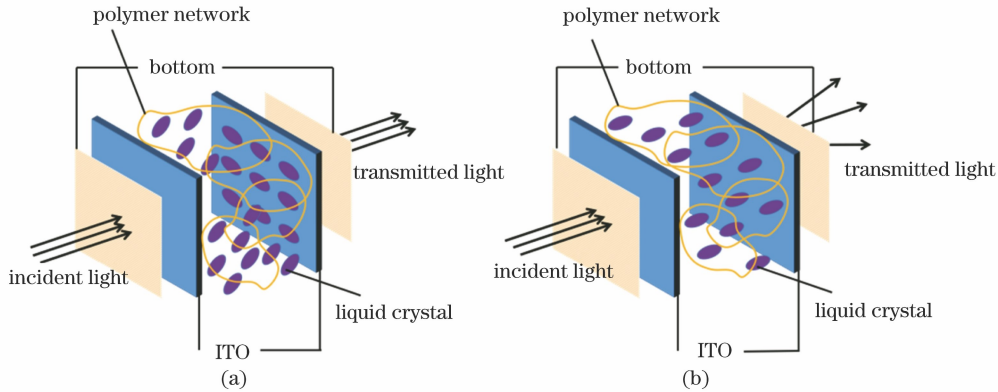


图 2 PDLC 薄膜的工作机制。(a) 通电前; (b) 通电后

Fig. 2 Working mechanism of PDLC thin film. (a) Before electrification; (b) after electrification

制备透射式 PDLC 薄膜的关键工艺参数: E7 与 NOA65 的质量比为 55:45, 通过多次振荡进行混合; PDLC 薄膜的厚度为 $7.5 \mu\text{m}$; 紫外光敏单体在紫外线灯(功率为 36 W, 波长为 365 nm)的作用下照射 20 min。

PDLC 薄膜中: 单体分子由外部紫外光诱导, 具有形成聚合物的聚合能力; 随着聚合度的增加, 液晶分子的溶解度逐渐降低。当溶解度小于一定阈值时, 液晶分子析出, 最后液晶分子会分散在聚合物中。

设液晶和单体的化学势能分别为 μ_{LC} 和 μ_{M} , 表达式为

$$\begin{cases} \mu_{\text{LC}} = \mu_{\text{LC}}^0 + KT \ln \left(\frac{N_{\text{LC}}}{N_{\text{LC}} + N_{\text{M}}} \right) \\ \mu_{\text{M}} = \mu_{\text{M}}^0 + KT \ln \left(\frac{N_{\text{M}}}{N_{\text{LC}} + N_{\text{M}}} \right) \end{cases}, \quad (2)$$

式中: 下角标 LC 表示液晶; 下角标 M 表示单体; μ_{LC}^0 表示纯液晶状态下的化学势能; μ_{M}^0 表示纯单体状态下的化学势能; N_{LC} 表示混合物中液晶分子的数目; N_{M} 表示混合物中单体分子的数目; K 是玻耳兹曼常数; T 表示绝对温度。当 PDLC 薄膜处于热平衡状态时, 膜中各组分的化学势能均相等。在弱光照区域, 单体在紫外光的作用下发生聚合, 逐渐形成聚合物, 则该区域的单体数量减少。由于单体的化学势能逐渐降低, 由(1)式和热平衡原理可知, 单体从弱光照区迁移到强光照区, 其化学势能得到补偿。同样, 在强光照区域, 由于单体数量的减少, 液晶的化学势能逐渐增加, 基于热平衡原理可知, 液晶

列相液晶 E7 和 Norland 公司所生产的紫外光敏单体 NOA65, 在 20°C 温度和 589 nm 波长下, E7 的折射率 $n_e = 1.7472$, NOA65 的折射率 $n_o = 1.5217$ 。采用聚合相分离(PIPS)法制备出透射式 PDLC 薄膜, 其工作机制如图 2 所示。

从强光照区域迁移到弱光照区域, 其化学势能能得到补偿, 最终完成相分离。

在无电压的条件下, PDLC 薄膜中液晶微滴的指向矢是随机分布的, 即液晶的有效折射率与聚合物网络的折射率不同, 此时入射光将会发生散射或反射; 在有电压的状态下, 液晶微滴将沿电场方向重新排列, 即液晶的有效折射率恰好与聚合物网络的折射率相同, 此时形成了透明状态, 入射光将直接穿过, 如图 2 所示。

2.3 基于 PDLC 薄膜的光场显示

仅考虑水平视差的情况, 由于光线在自由空间中的波长变化较小, 观赏者在某一时刻观察到三维物体的光场可以表示为 $L(x, y, z, \theta)$, 其中 θ 为光线传播的方向。设 PDLC 薄膜位于 $z = z_1$ 处, 显示面板上在点 $O_1(x_1, y_1, z_1)$ 发出的光波与 PDLC 薄膜的交点为 $N(x_i, y_i, z_i)$, 理想状态下设方向向量为 $(\sin \theta_1 \cos \varphi_1, \sin \theta_1 \sin \varphi_1, \cos \theta_1)$, 则直线 O_1N 可以表示为

$$\frac{x_1 - x_i}{\sin \theta_1 \cos \varphi_1} = \frac{y_1 - y_i}{\sin \theta_1 \sin \varphi_1} = \frac{z_1 - z_i}{\cos \theta_1}, \quad (3)$$

式中: (θ_1, φ_1) 表示直线方向。N 点的坐标可表示为

$$\begin{cases} x_i = (z_1 - z_i) \tan \theta_1 \cos \varphi_1 + x_1 \\ y_i = (z_1 - z_i) \tan \theta_1 \sin \varphi_1 + y_1 \end{cases}. \quad (4)$$

令 $A = \tan \theta_1 \cos \beta_1$ 和 $B = \tan \theta_1 \sin \beta_1$ 分别表示水平方向和垂直方向的空间角度信息, 则在点 O_1 发出的光波与 N 的连线 O_1N 在屏幕上的光场信息可以表示为 $L_1 = L(x_1, y_1, A, B)$, 其中 β_1 为空间

极坐标。若仅考虑水平方向的光场信息, L_1 可进一步简化为 $L_1 = L(x_1, y_1, A)$ 。本文提出的 PDLC 薄膜的调制函数可表示为

$$L_2 = F(x, y, \gamma), \quad (5)$$

式中: γ 表示调制因子; $F(x, y, \gamma)$ 表示调制函数。入射的光线经过液晶分子后会逐渐衰减, 衰减程度与 PDLC 薄膜的透射率紧密相关。PDLC 薄膜的透射率会随着外加电信号的变化而发生改变。设 L_0 为透射率, L 为最大透射率, 则有

$$L_0 = L(E_{\text{pdlc}}), \quad (6)$$

$$\partial(E_{\text{pdlc}}) = \eta \cdot s \cdot (E_{\text{pdlc}}) \cdot d, \quad (7)$$

式中: η 表示液晶分子的密度; s 表示平均散射的横截面积; E_{pdlc} 表示外加电压; d 表示液晶 D 型光学元件的厚度, 即光线传播的路径。PDLC 加载外加电压后, PDLC 薄膜的透射率得到提升, 在传感器上可获取到高分辨率的三维显示结果。

对于传统的光场显示方法, 由虚拟相机产生的元素图像阵列经透镜阵列后形成了离散的三维图像, 图像中存在目标物体细节信息不连续和不平滑等问题。采用 PDLC 薄膜后, 可有效调制穿过透镜阵列的光线, 使得观赏者能够接收到连续、平滑的三维物体信息, 形成高清的三维立体图像。调制后的光场信息可表示为

$$\begin{aligned} \psi'_c(x, y, z; \lambda, t) &= \psi_c(x, y, z; \lambda, t) \cdot \\ &F(x, y, \gamma) \cdot L_0 = \\ &\iint_{\Omega} \varphi_0\left(\frac{\alpha}{\lambda}, \frac{\beta}{\lambda}; t\right) \exp\left[i\frac{2\pi}{\lambda}(1 - \alpha_{mn}^2 - \beta_{mn}^2)^{\frac{1}{2}}z\right] \times \\ &\exp\left[i2\pi\left(\frac{\alpha}{\lambda}x + \frac{\beta}{\lambda}y\right)\right] d\left(\frac{\alpha}{\lambda}\right) d\left(\frac{\beta}{\lambda}\right), \quad (8) \end{aligned}$$

式中: Ω 表示三维物体的观看视角; φ_0 表示初始相位。当未加载电压时, 寻常光(o 光)和非寻常光(e 光)均会通过 PDLC 薄膜入射到图像传感器上, 设此时图像为 I_0 。通入电压 V_1 后, 设此时图像为 I_1 ; 通入电压 V_2 后, 设此时图像为 I_2 ; 通入电压 V_n 后, 设此时图像为 I_n , 则

$$I_g = I_1 \oplus I_2 \oplus \cdots \oplus I_n, \quad (9)$$

式中: \oplus 表示图像融合操作。利用人眼的暂留/余晖效应, 将包含不同光场信息的若干幅图像(I_1, I_2, \cdots, I_n) 进行融合, 此时观赏者可获得较为高清的三维图像信息 I_g 。当 PDLC 薄膜的透射率较高时, 透射的光线包含了较为丰富的三维物体细节信息; 当 PDLC 薄膜的透射率降低时, 透射光的散射强度会有所提升。于是, 通过连续调控外加的电场, 最终能够获得高清的光场图像。PDLC 薄膜的复现如图 3 所示。

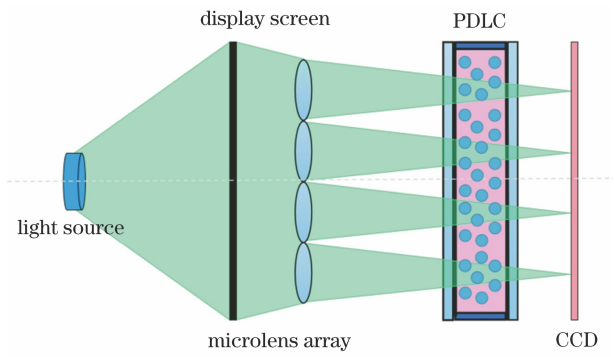


图 3 PDLC 薄膜的复现示意图

Fig. 3 Schematic of reproduction of PDLC thin film

3 结果分析与讨论

为了验证所提方法的光场显示效果, 使用 3DMAX2016 软件创建了三个三维模型, 依次为“斯坦福兔子”“WIT 校徽”和“紫水晶”。

为了生成三维物体的元素图像阵列, 在 3DMAX2016 软件中设置了一个虚拟相机阵列。其中, 虚拟相机的阵列数为 60×60 , 虚拟相机的焦距为 5.2 mm, 虚拟相机的间距 0.15 mm, 虚拟相机的视角为 45° , 虚拟相机的分辨率为 $600 \text{ pixel} \times 600 \text{ pixel}$ 。在 3DMAX2016 软件中, 设置渲染图像的分辨率为 $200 \text{ pixel} \times 200 \text{ pixel}$ 。

在光场显示端, 采用的玻璃型微透镜阵列参数: 相邻两个单元微透镜的间距为 0.15 mm, 微透镜阵列的焦距为 5.2 mm, 微透镜的阵列数为 60×60 , 微透镜阵列的折射率为 1.5, 微透镜阵列的散射损耗为 0.01。PDLC 薄膜的驱动电压(方均根值)为 12 V, 驱动电压的电场频率为 1 kHz。最终的光场显示结果由迈德威视公司生产的 MV-SUA500C-T 工业相机 CMOS(像元尺寸为 $2.2 \mu\text{m} \times 2.2 \mu\text{m}$, 光学尺寸为 $1/2.5$, 分辨率为 $2592 \text{ pixel} \times 1244 \text{ pixel}$) 捕获。

此外, 使用的计算机软、硬件配置: 处理软件采用的是 MATLAB 2018b; 处理器为 Intel © Core™ i7-4790 CPU@3.6 GHz, 显卡为 NVIDIA © GeForce GTX 1050(4 GB), 以及 4 GB 的 RAM 内存。实验搭建的详细光路如图 4 所示。

图 5 为 PDLC 薄膜的透射率测试曲线。测试设备采用由上海菁华科技仪器有限公司生产的 723PC 型光度分光仪。

当 PDLC 薄膜未加载外加电压时, 由于 PDLC 的散射效应, 其透射率较低, 显示结果如图 6(a) 所示; 当加大加载的电压后, PDLC 薄膜中液晶分子的

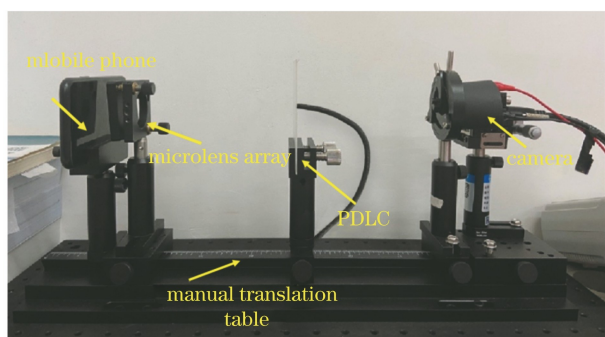


图 4 实验场景图

Fig. 4 Experimental scene diagram

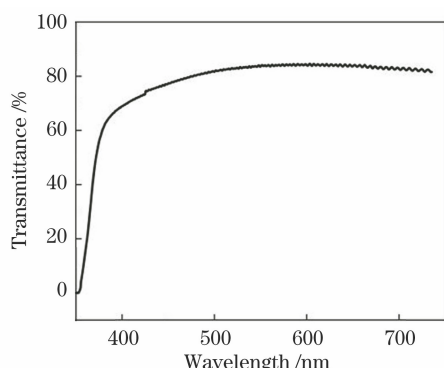


图 5 PDLC 薄膜的透射率测试曲线

Fig. 5 Transmittance test curve of PDLC thin Film

指向矢逐步向入射光的方向发生偏转,该薄膜的透射率增大,其显示结果中细节信息也更加丰富,如图 6(b)和图 6(c)所示。

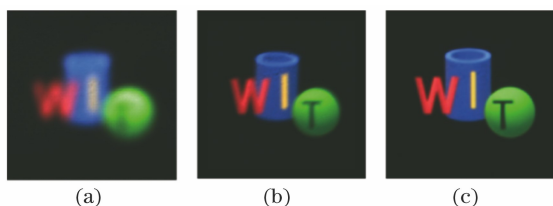


图 6 不同电压下的光场显示结果。(a) 0; (b) 15 V; (c) 20 V

Fig. 6 Light field display results under different voltages.

(a) 0; (b) 15 V; (c) 20 V

PDLC 薄膜的光场显示结果如图 7 所示。如图 7(d)~7(f)所示,三个物体(“斯坦福兔子”“WIT 校徽”和“紫水晶”)的元素图像集合;运用本文提出的含有 PDLC 薄膜的光场显示方法,最终获取的光场显示结果如图 7(g)~7(i)所示。

为了进一步证明本文提出方法的有效性,将所提方法与陈可鸣等^[17]提出的基于扩散片的光场显示(HD)法、Rong 等^[18]提出的基于全息像素的光场显示(HBH)法和 Wen 等^[19]提出的含有扩散功能屏的光场显示(HFS)法进行对比实验。具体对比实

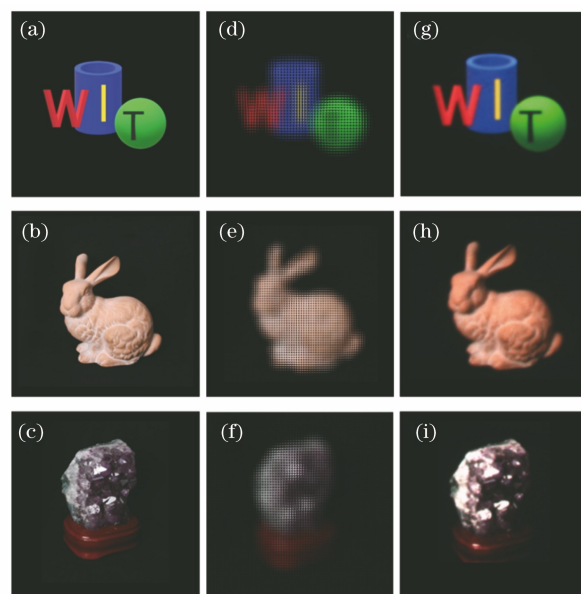


图 7 PDLC 薄膜的光场显示结果。(a)~(c) 原始渲染的图像;(d)~(f)元素图像阵列;(g)~(i)光场显示结果

Fig. 7 Display results of light field of PDLC thin film. (a)~(c) Original rendered image; (d)~(f) element image array; (g)~(i) light field display result

验过程:采用上述方法对同一“斯坦福兔子”模型进行光场显示,并将得到的显示结果进行直观比较,对比实验结果如图 8 所示。

由于当前光场显示领域中暂时还没有广泛认可、统一的光场显示质量评价标准或指标,于是本文借用传统数字图像处理中的峰值信噪比(PSNR)和结构性相似指数(SSIM)两个量化指标^[20],对几种方法的最终显示质量进行横向对比评价。

PSNR 和 SSIM 的表达式为

$$x_{\text{PSNR}} = 10 \lg \left\{ \frac{255}{m^* n^* \sum_{x=0}^{m^*-1} \sum_{y=0}^{n^*-1} [u(x,y) - v(x,y)]^2} \right\}, \quad (10)$$

$$x_{\text{SSIM}} = \frac{(2\mu_u \mu_v + c_1)(2\sigma_{uv} + c_2)}{(\mu_u^2 + \mu_v^2 + c_1)(\sigma_u^2 + \sigma_v^2 + c_2)}, \quad (11)$$

式中: $u(x,y)$ 和 $v(x,y)$ 分别表示显示图像和原始图像,大小均为 $m^* \times n^*$; μ_u 和 μ_v 分别表示 u 和 v 的均值; σ_u^2 和 σ_v^2 分别表示 u 和 v 的方差; σ_{uv} 表示 u 和 v 的协方差; c_1 和 c_2 表示不同的常数项。

如图 8 所示:HD 法使用的是传统的扩散片,其可见光的透射率较低,得到的显示结果较为一般;HBH 法基于全息像素设计了全新散射片,其在可见光状态下有 79%的透射率,较 HD 法的显示效果

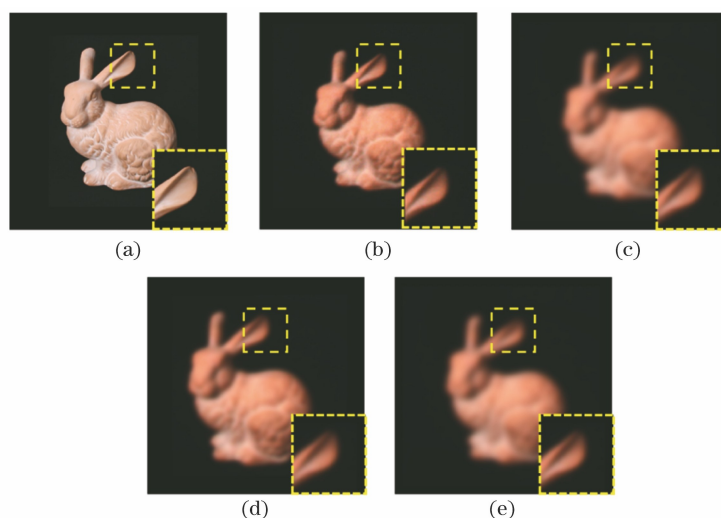


图 8 不同方法的显示结果及其局部放大图。(a)参考图像;(b) PDLC 法;(c) HD 法;(d) HBH 法;(e) HFS 法
Fig. 8 Results of different methods and their local magnification. (a) Reference image; (b) PDLC method; (c) HD method; (d) HBH method; (e) HFS method

有所提升,但该方法仍无法调节显示屏亮度,无法展现出更多的细节信息,还会造成整体亮度偏暗,显示效果不佳;HFS 法设计了一种新型的全息功能屏,在提高可见光透射率的前提下,配合微透镜阵列可以进一步提升显示质量。横向对比图 8 的其他三种实验结果,PDLC 法的实验结果与 HFS 法相近,但 PDLC 法的 SSIM 值为 0.9375,而 HFS 法的 SSIM 值为 0.9277,这表明使本文所提出的方法可以获得更高的显示质量。

与其他三个方法相比,本文提出的方法可以获得与原始三维场景几乎一致的三维显示结果,并且所呈现的细节部分更加清晰。这表明,本文提出的方法能够与当前先进的光场显示方法相媲美。

图 9 展示了上述 4 种光场显示方法在不同显示深度下的 PSNR 值。由图 9 可以看出,PDLC 法在不同深度下的结果稳定,且整体上优于其他三种显示方法。表 1 展示了 4 种光场显示方法在不同深度下的 PSNR 平均值和标准差(SD)。由表 1 可以看出,PDLC 法的 PSNR 平均值最大,所呈现图像的峰值信噪比提高了约 11%,标准差最小,这说明 PDLC 法能提供最为清晰的三维显示图像。

本文除了借用传统数字图像处理中的 PSNR 和 SSIM 作为量化指标以外,还使用调制函数计算了图 8 中局部放大图的横向分辨率并将其作为对比指标^[21]。

图 10 展示了不同光场显示方法在各空间频率下的调制函数值。由图 10 可以看出,PDLC 法获得

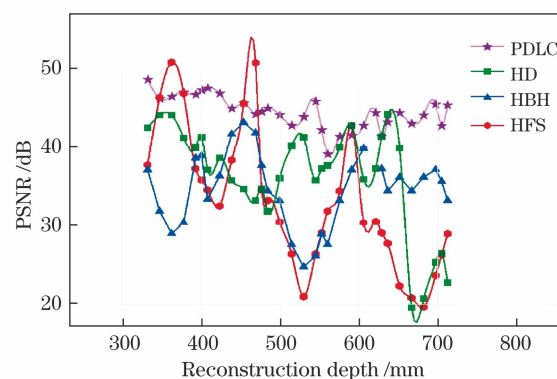


图 9 不同方法下光场显示结果的 PSNR 值
Fig. 9 PSNR values of light field display results under different methods

表 1 不同方法的 PSNR 的平均值和标准差值
Table 1 Mean value and standard deviation of PSNR of different methods

Parameter	PDLC	HD	HBH	HFS
Mean /dB	39.2	32.8	37.5	42.3
SD /dB	2.75	3.50	3.20	4.70

的显示结果与 HFS 法在不同空间频域下的调制函数数值相似,但在高频部分本文提出的方法更为优秀一些。

另外,HD 法和 HBH 法在高频和低频部分的图像质量均低于本文提出的 PDLC 法,且波动较大,表明显示效果不佳。该实验结果表明,基于 PDLC 薄膜的光场显示系统得到的图像,其分辨率更高一些。

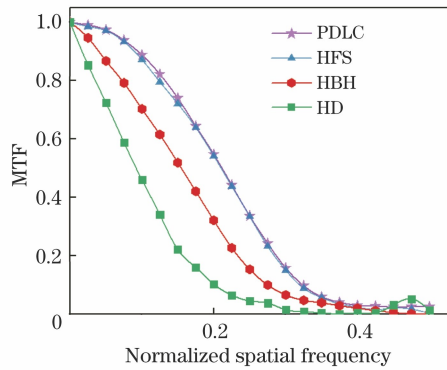


图 10 不同方法下光场显示结果的调制函数曲线
Fig. 10 Modulation function curves of light field display results under different methods

4 结 论

本文提出了一种基于 PDLC 薄膜的方法,用来解决当前光场显示系统的搭建难度大、实用性低和结果分辨率偏低等共性问题。与当前三种现有的先进光场显示方法相比,本文提出的方法不依赖复杂的硬件条件,可在较短时间内获得高分辨率的光场显示结果。经过一系列的实验,结果表明本文提出的方法具有较好的效果,可以与当前先进的光场显示方法相媲美。但是,本文的研究工作还存在一些不足,如本文方法对物理器件有较高的要求,对实验场景有一定的局限性。另外,器件加工的难度也使本系统不支持宽视场场景的应用。在后期的工作中,可以考虑搭建更大的实验场景进行实验,在保证观看视角的前提下进一步提升图像的分辨率。

参 考 文 献

- [1] Liu Z M, Yao J Y, Xu F Y, et al. Computer generated integral color rainbow holography three-dimensional display[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(10): 1009002.
刘子陌, 姚建云, 许富洋, 等. 计算机集成彩色彩虹全息三维显示[J]. *光学学报*, 2021, 41(10): 1009002.
- [2] Shi X, Ai L Y, Yu M, et al. Full-parallax three dimensional display based on light field camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(7): 0711005.
石肖, 艾灵玉, 于淼, 等. 基于光场相机的全视差三维显示[J]. *光学学报*, 2020, 40(7): 0711005.
- [3] Li M, Piao Y, Deng L J. Spatial resolution of naked eye three-dimensional integral imaging display based on LED screen[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(6): 061004.
李敏, 朴燕, 邓莉巾. 基于 LED 屏裸眼三维集成成像显示技术的空间分辨率研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(6): 061004.
- [4] Huang H, Hua H. Effects of ray position sampling on the visual responses of 3D light field displays[J]. *Optics Express*, 2019, 27(7): 9343-9360.
- [5] Hua H, Javidi B. A 3D integral imaging optical see-through head-mounted display[J]. *Optics Express*, 2014, 22(11): 13484-13489.
- [6] Zhao J, Ma Q G, Xia J, et al. Hybrid computational near-eye light field display[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(1): 1-10.
- [7] Park M C, Lee H D, et al. Interactive 3D simulator for autostereoscopic display systems [EB/OL]. [2021-08-19]. https://www.researchgate.net/publication/278968594_Interactive_3D_Simulator_for_Autostereoscopic_Display_Systems.
- [8] Jeong H I, Kim B, Ku M, et al. P-86: light field simulation for 3D displays with various pixel structures[J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2019, 50(1): 1557-1560.
- [9] Jen T H, Shen X, Yao G, et al. Dynamic integral imaging display with electrically moving array lenslet technique using liquid crystal lens[J]. *Optics Express*, 2015, 23(14): 18415-18421.
- [10] Lü G, Wang Q H, Wang J, et al. Multi-view 3D display with high brightness based on a parallax barrier[J]. *Chinese Optics Letters*, 2013, 11(12): 121101.
- [11] Wetzstein G, Lanman D, Heidrich W, et al. Layered 3D[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2011, 30(4): 1-12.
- [12] Chen D, Sang X Z, Yu X B, et al. Performance improvement of compressive light field display with the viewing-position-dependent weight distribution[J]. *Optics Express*, 2016, 24(26): 29781-29793.
- [13] Teng D D, Liu L L. P-95: full resolution 3D display on computer screen free from accommodation-convergence conflict[J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2017, 48(1): 1607-1609.
- [14] Geng J. Three-dimensional display technologies[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2013, 5(4): 456-535.
- [15] Jen T H, Shen X, Yao G, et al. Dynamic integral imaging display with electrically moving array lenslet technique using liquid crystal lens[J]. *Optics Express*, 2015, 23(14): 18415-18421.
- [16] Wang J G, Xiao X, Yao G, et al. Synthetic aperture integral imaging display with moving array lenslet technique[J]. *Journal of Display Technology*, 2015, 11(10): 827-833.
- [17] Chen K M, Xing H Y. A study of holographic functional screen based integral imaging[J]. *The*

- Journal of Light Scattering, 2019, 31(2): 180-184.
陈可鸣, 幸浩洋. 一种基于全息功能屏的集成成像技术研究[J]. 光散射学报, 2019, 31(2): 180-184.
- [18] Rong X W, Yu X Y, Guan C X, et al. A hogel-based holographic recording system and its hologram reconstruction improvement [J]. Optik, 2013, 124(18): 3642-3645.
- [19] Wen J, Yan X P, Jiang X Y, et al. Integral imaging based light field display with holographic diffusor: principles, potentials and restrictions[J]. Optics Express, 2019, 27(20): 27441-27458.
- [20] Hoshino H, Okano F, Isono H, et al. Analysis of resolution limitation of integral photography[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1998, 15(8): 2059-2065.
- [21] Boreman G D. Modulation transfer function in optical and electro-optical systems[M]. Bellingham: SPIE, 2001.