

激光与光电子学进展

基于双层半色调图像联合编码的超多视点和
高灰阶光场显示(特邀)

齐浩程, 于迅博*, 张钊赫, 桑新柱, 颜玢玢, 高鑫, 邢树军

北京邮电大学电子工程学院, 北京 100876

摘要 提出一种基于双层半色调图像联合编码的光场显示装置。该装置由准直背光、双层菲林片、滤光片、非球面柱透镜阵列和垂直扩散膜组成。菲林片用于显示半色调光场编码图像, 滤光片用于实现红绿蓝三色通道, 非球面柱透镜阵列和垂直扩散膜用于调控光线的出射方向。为了实现超多视点和高灰阶的光场显示, 利用双层菲林光场编码提升视点数目, 利用半色调图像联合优化方法合成双层菲林结构上的光场编码图像, 扩展灰阶范围。在验证实验中, 实现了超多视点、高灰阶、彩色的三维光场显示效果, 视点数量达到 165 个, 灰阶达到 $256 \times 256 \times 256$ 。

关键词 三维显示系统; 光场显示; 体像素; 灰阶等级

中图分类号 TN27

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP240646

Dense Viewpoints and Light-Field Display with High Grayscale Based on
Joint Encoding of Double-Layer Halftone Images (Invited)

Qi Haocheng, Yu Xunbo*, Zhang Zhaohe, Sang Xinzhu, Yan Binbin, Gao Xin, Xing Shujun

School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract A light-field display device based on dual-layer halftone image joint encoding is proposed herein, consisting of collimated backlight, a double-layer film, a filter, an aspherical cylindrical lens array, and a vertical diffusion film. The double-layer film is used for displaying halftone light-field-encoded images; the filter is used for generating red, green, and blue channels; and the aspherical cylindrical lens array and the vertical diffusion film are used for controlling the direction of light emission. Dense viewpoints and high-grayscale light-field display are obtained with the double-layer film. The number of viewpoints is increased through light-field encoding, and light-field-encoded images are synthesized on double-layer film structures using a halftone image joint optimization method. Thus, the grayscale range is expanded. In a verification experiment, a three-dimensional light-field display effect with dense viewpoints, high grayscale, and color was realized (165 viewpoints with a grayscale of $256 \times 256 \times 256$).

Key words 3D display system; light-field display; voxel; grayscale level

1 引言

三维显示可以提供真实自然的立体效果, 在医学和教育等领域具有广阔的应用潜力^[1-3]。三维显示技术包括全息显示、集成成像显示、自由立体显示和光场显示等。其中, 光场显示通过在空间中重构三维场景的发光分布来模拟自然真实的三维场景, 被认为是目前发展最快的三维显示技术之一^[4-14]。视点数量和灰阶在光场显示中是评价显示质量的核心指标, 提高视

点数量和灰阶有助于提升光场显示的质量^[15-17]。国内外诸多科研团队对提高视点数量和灰阶的方法进行了研究。提高视点数量的一种方法是在时间维度上利用复用技术来增加显示信息的数量, 从而增加视点^[18-19]。另一种方法是在不增加信息量的情况下, 通过设计显示系统调整不同区域的视点数量, 达到提高视点数量的效果^[20-21]。为了提高显示系统的灰阶, 现有的解决方案有 LCD 显示屏使用的帧率控制(FRC)像素抖动算法^[22]和 LED 显示屏使用的脉宽调制算法^[23]。然而,

收稿日期: 2024-01-30; 修回日期: 2024-02-16; 录用日期: 2024-03-05; 网络首发日期: 2024-03-13

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFB3611500)、国家自然科学基金(62175015)

通信作者: *yuxunbo@126.com

这些方法都无法做到视点数量和灰阶的同时提升。为了解决这一问题,研究人员提出了一种基于浮动网格复用半色调打印方法^[24]。该方法通过复用网格利用半色调点,提高静态光场显示系统的视点数量和灰阶。但是,由于浮点网格在水平方向上使用两列半色调墨点表示一个像素,其视点数量的提高效果有限。

本文提出了一种基于双层半色调图像联合编码的超多视点和高灰阶光场显示系统。设计了一种竖条型像素的光场编码方法,该方法利用一维半色调墨点来打印竖条型像素,每个竖条型像素是由 $55 \times 3 \times 2$ 个半色调墨点组成的,其中 $\times 2$ 表示使用双层墨点,像素的宽度为 $6.35 \mu\text{m}$,高度为 $1047.75 \mu\text{m}$ 。竖条型像素的光场编码方法充分利用了控光单元水平方向上的半色调墨点。当采用截距为 1.05 mm 的柱透镜作为控光元件时,可以在 100° 的观看视角范围内实现 165 个视点,这种竖条型的像素编码方法可以有效提升视点数量。还设计了一种双层半色调图像联合编码方法,该方法采用两层菲林来显示编码图像,通过计算拟合高灰阶的像素来获得编码图像。利用两层编码图像对背光进行联合调制来显示像素的灰阶信息,通过两次强度调制,显示的立体图像具有 $256 \times 256 \times 256$ 的三色灰阶,双层半色调图像联合编码增加了系统所能显示的灰阶数量。最终,通过实验验证了所提方法的合理

性,实现超多视点、高灰阶、彩色的三维光场显示。

2 基本原理

2.1 系统结构

图 1(a) 是基于双层半色调图像联合编码的光场显示系统结构,该系统由 5 个主要部件组成:准直背光、双层菲林片、滤光片、非球面柱透镜阵列 (ACLA) 及垂直扩散膜 (VDF)。这些部件一起工作构成光场显示系统的硬件。其中准直背光位于结构最后方,为系统提供平行光源。准直光束首先通过双层菲林片得到光强调制,在这一过程中,菲林片通过控制半色调墨点透射的面积来调制准直光束的光强。光束再通过滤光片得到颜色调制,同一像素三个 RGB 颜色分量的光束会携带各自对应的颜色信息。非球面柱透镜阵列反贴在滤光片的前面,用来对光束进行角度调制。最后,垂直扩散膜在垂直方向上加宽光束,以确保显示系统在垂直方向上具有均匀视角。垂直扩散膜是一种使用定向激光散斑法制成的光线扩散膜。通过激光控制膜上散斑的形状和位置,垂直扩散膜能够使光束在特定的方向上以一定角度扩散,从而增加垂直方向上的观看视角。准直光束在通过上述结构后,在水平方向上发生角度的改变,在可视范围内形成均匀的视差关系。

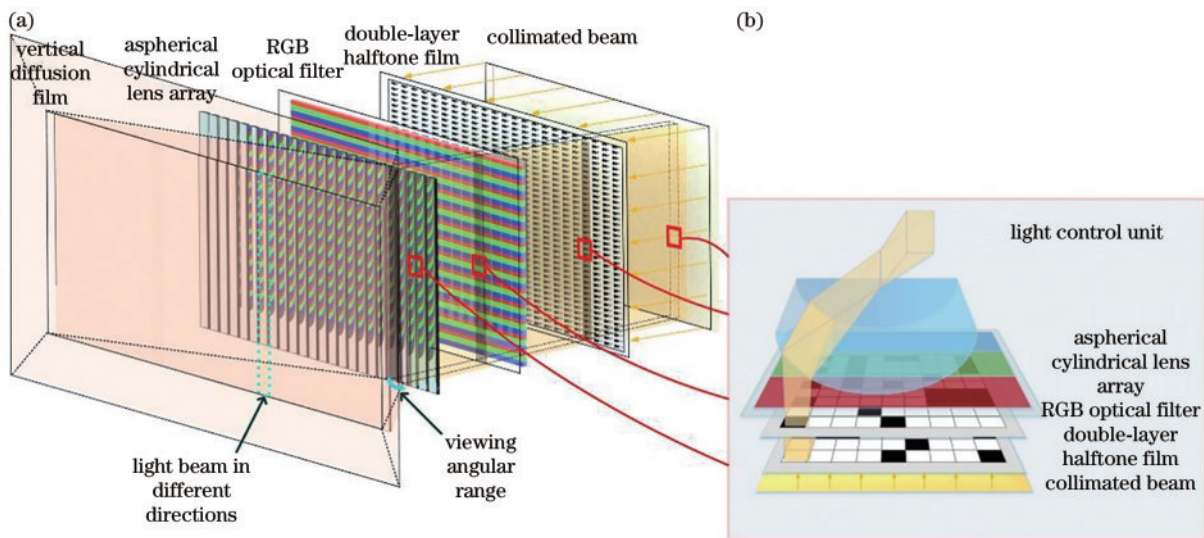


图 1 系统示意图。(a) 基于双层半色调图像联合编码的光场显示系统结构;(b) 系统控光单元结构和光路

Fig. 1 System schematic. (a) Structural of light-field display system based on joint encoding of double-layer halftone images; (b) structural diagram and optical diagram of optical control unit of the system

图 1(b) 展示了光场显示系统控光单元的结构和光束的光路。通过双层菲林片和滤光片的光束在非球面柱透镜上进行折射,折射的光束会在透镜的主轴处会聚。会聚后的光束再经过发散,形成不同方向的光束。当观看者处于观看位置时,他们可以看到多个方向的光束组成的完整视差图像,从而获得立体的视觉。

2.2 光场编码与体像素构建

为了满足光场显示系统高视点数量的显示要求,本文设计了可以构建超多视点的光场编码方法,图 2 是光场显示系统的光场编码和体像素构建原理。由于非球面柱透镜阵列只提供水平方向的视差,所以要想增加视点数量就需要在控光单元中增加可控光束的数量。光场编码利用双层菲林片上对应的一维半色调墨

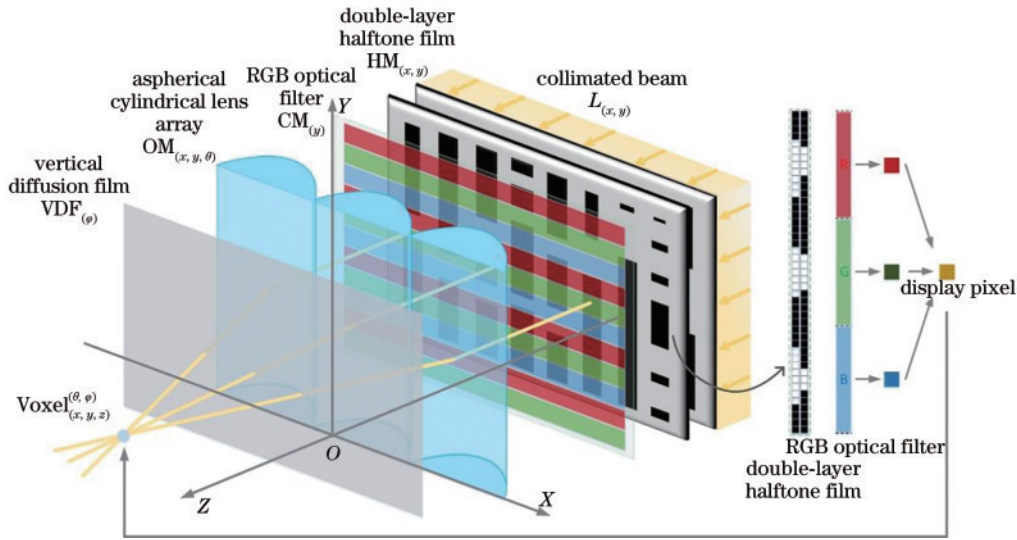


图 2 光场显示系统的光场编码和体像素构建原理

Fig. 2 Structural diagram of coding and voxels construction for light-field display system

点打印竖条型像素,所以每个像素在水平方向上只有 1 个半色调墨点。一系列半色调墨点调控一束可控光的强度,单个控光单元的控光束数量就是控光单元在水平方向上可以容纳的墨点数。这种竖条型的光场编码方法在水平方向上增加了可控光束的数量,充分利用了控光单元水平方向上的半色调墨点,有效地提升了视点数量。

光场显示系统准直背光提供的光束通过双层菲林片、滤光片、非球面柱透镜阵列和垂直扩散膜,分别实现了光强调制、颜色调制、角度调制和纵向扩散。光束在经过多项调制后发射到各个方向,并且携带着正确的光场信息,其在空间上的构成表达为

$$\text{Voxel}^{\{\theta, \varphi\}}(x, y, z) = L(x, y) \cdot \sum [HM(x, y) \cdot CM(y)] \cdot OM(x, y, \theta) \cdot VDF(\varphi), \quad (1)$$

式中: $HM(x, y)$ 是光强调制函数,光束的强度是由它所通过的菲林片的透光面积与遮光总面积的比值决定的,不同的光束强度决定了每个像素的灰阶等级; $CM(y)$ 是颜色调制函数,滤光片在水平方向上呈现连续的单一颜色分布,在垂直方向上则呈现为 RGB 颜色的交替分布。当同一像素的三束准直光束通过滤光片后,便能够获得构成该像素的三个 RGB 颜色分量。在完成强度调制和颜色调制后,这三通道的光束经过融合在滤光片上形成显示像素。 $OM(x, y, \theta)$ 是角度调制函数,显示像素发出的光束被均匀发散到不同方向。 $VDF(\varphi)$ 是纵向扩散函数,将发射的光束在垂直方向上扩散。被调制后的光束与其他不同角度的光束在空间中交汇,完成体像素的构建。观看者处于正确的视点位置时,就可以得到体像素不同方向的图像信息,从而看到三维立体场景。

2.3 双层半色调图像联合编码

光场显示系统通过菲林片记录光场编码图像信

息,菲林片采用一维半色调墨点进行编码,使编码后的像素分离出 RGB 三个颜色通道。一维半色调墨点组成的像素灰阶需要满足常用显示器 $256 \times 256 \times 256$ 的灰阶要求。在仅使用单层菲林片和一系列半色调墨点的情况下,每个像素能够显示的灰阶数量由一系列半色调墨点的数量来决定,单层菲林片上表示一个像素的半色调墨点数量需要有 255×3 个,如图 3 所示。为了保证从透镜出射的显示像素保持正方形样式,控光单元在水平方向上可以容纳的半色调墨点数量应与构成显示像素的一系列半色调墨点数量相一致,即 255×3 。但是为了保证空间分辨率不低于人眼分辨率,控光单元的尺寸不能随意增大。又由于光学透镜的设计受到制造技术的限制,确定半色调墨点尺寸的透镜漫射光斑半径具有一定的下限,因此半色调墨点的尺寸也有一定的下限。受到上述多种因素的限制,在 4000 dpi 的打印精度下,控光单元在水平方向上可以容纳的半色调墨点数量只有 165 个,不满足垂直方向上灰阶数量 255×3 的数量要求。在高灰阶显示中,静态光场显示器难以准确还原光束的颜色信息。为了解决显示过程中的低灰阶问题,提出了一种双层半色调图像联合编码的方法,以增加系统显示的灰阶数量。

所提方法利用双层菲林片结构对光束进行两次强度调制,在 4000 dpi 的打印精度下,每层菲林片上使用 55×3 个一维半色调墨点,如图 3 所示。半色调墨点打印在菲林片的药膜面上,两层菲林片的药膜面在叠加时相对放置。因此,两列一维半色调墨点在双层菲林片结构中紧密贴合。同时,两层菲林片上的半色调墨点进行精准对位,保证两层菲林片叠加后不同列的半色调墨点不会重叠。叠加后双层菲林片结构的光束透过率为两层菲林片光束透过率的乘积。在第一次调制中,采用粗调制的方式。通过控制光束的强度,光束被调制为单层菲林片所能提供的最接近的灰阶等级。在

第二次调制中,基于第一次调试的结果,采用细调制进行细化补偿,从而得到中间灰度等级,进而增加可实现

的灰阶数量。双层半色调图像联合编码的详细算法流程如图 4 所示。

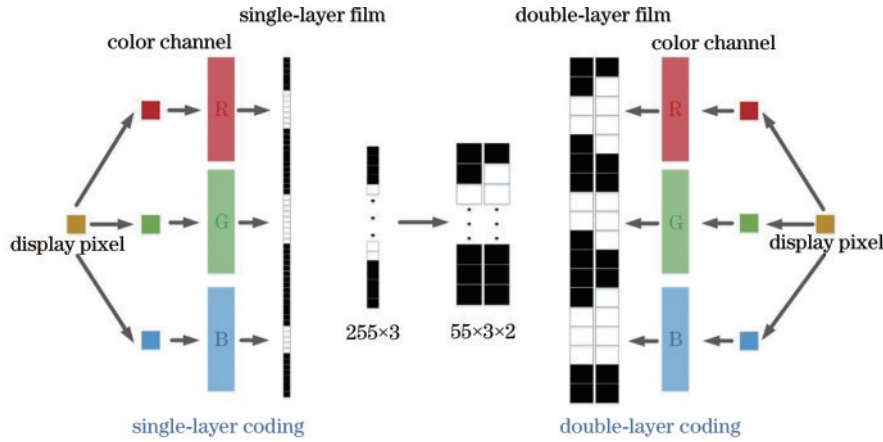


图 3 光场显示系统的灰阶映射示意图

Fig. 3 Structural diagram of grayscale mapping for light-field display system

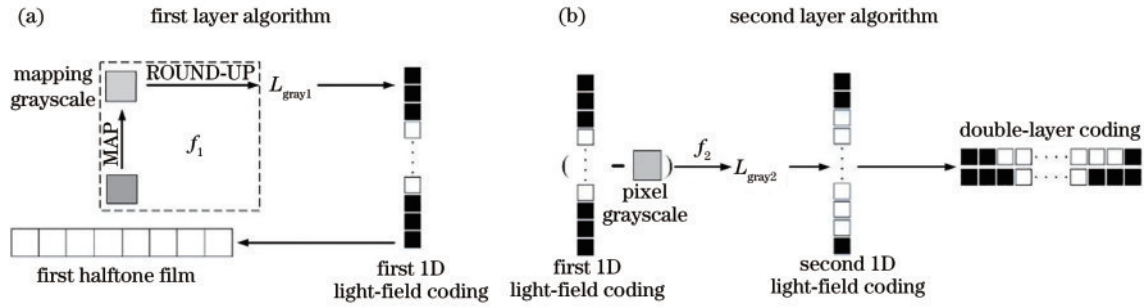


图 4 双层半色调图像联合编码流程。(a)第一层算法;(b)第二层算法

Fig. 4 Flow-process diagram of double-layer halftone images joint coding. (a) First layer algorithm; (b) second layer algorithm

两层菲林片均采用 4000 dpi 的打印精度,利用第二层菲林片水平方向上的半色调墨点位置来决定视差图像的选取,再通过双层半色调图像联合编码算法确定这两层半色调墨点的具体打印内容,从而生成合成编码图像。这两层菲林片的墨点共同表示编码图像上一个像素的灰度数值。其中,第一层菲林片像素编码所设置的墨点数目为

$$L_{gray1}:f_1(C)=\left\lceil \frac{C}{A_M} \cdot A_m \right\rceil, \quad (2)$$

式中: L_{gray1} 为第一层菲林片所设置的墨点数目; C 为该列半色调墨点对应的像素灰度分量数值; A_M 为原始图像每个灰度通道的等级数目; A_m 为第一层菲林片上每个灰度通道的等级数目,通过 $\frac{C}{A_M} \cdot A_m$ 的比例关系得到该灰度值在第一层菲林片上对应的浮点数;符号 $\lceil \rceil$ 表示向上取整,通过对墨点数进行向上取整操作,可以确保第一层菲林片确定的灰阶等级大于等于其对应的像素灰度等级。这样做可以避免因灰度值的转换而损失部分灰度级别信息。将向上取整后得到的整数值作为第一层菲林片编码所设置的半色调墨点数量,如图 4(a)编码流程所示。第二层菲林片的编码规则在

第一层的基础上确定,可表示为

$$L_{gray2}:f_2(C, L_{gray1}) = \text{int} \left\lceil \frac{N}{\frac{L_{gray1}}{A_m} \cdot A_m} \cdot A_n \right\rceil, \quad (3)$$

式中: L_{gray2} 为第二层菲林片所设置的墨点数目; N 为第一层菲林片像素编码所得到的墨点浮点数值; A_n 为第二层菲林片上每个灰度通道的等级数目。第二层菲林片对第一次强度调制后的光束进行二次强度调制,然后对其对应的第一层菲林片确定的灰度值与原始图像像素灰度值进行差值计算。接下来,通过第二层菲林片编码对得到的差值进行补偿,从而确定第二层菲林片编码应该设置的墨点数目,如图 4(b)所示。通过统计分析计算出,当准直光束的单个颜色分量对应的半色调墨点数量为 n 时,方法可以产生的灰阶总数为

$$S_n = \sum_{x=1}^n \left(\frac{n}{x} \right)^2. \quad (4)$$

为了验证上述双层半色调图像联合编码方法在增加灰阶等级数量上的有效性,对改进前仅使用单层半色调图像编码算法的光场显示系统与改进后使用双层

半色调图像联合编码算法的光场显示系统进行了灰阶等级光强对比实验。图 5(a)为光强测量的实验过程,该系统设计了尺寸为 64 cm×64 cm 的 256 灰阶等级图,其中每个灰度块的尺寸为 4 cm×4 cm,代表一个灰阶等级。然后分别采用单层编码和双层联合编码的方式,在 4000 dpi 的打印精度下打印出灰阶等级图,并进行光强的测量。实验在暗室环境下进行,使用照度计依次测量了两种不同编码方式的显示设备上每个灰阶等级的光强大小,结果如图 5(b)所示。从实验结果中可以看到,改进前的单层半色调图像编码显示的灰

阶等级-光强曲线呈阶梯型分布。在相邻的灰阶等级之间,光线强度存在相同的情况,该系统只能显示 56 个不同的灰阶等级,图像显示三色灰阶只有 56×56。而改进后的双层半色调图像联合编码方式得到的灰阶等级与光强成正比,每个灰阶等级都有不同的光线强度,系统可以显示 256 个不同的灰阶等级,从而使图像显示三色灰阶达到 256×256×256。双层半色调图像联合编码方式增加了灰阶等级数量,能够准确地再现原始图像所具有的灰阶等级,从而满足了光场显示系统对高灰阶显示的需求。

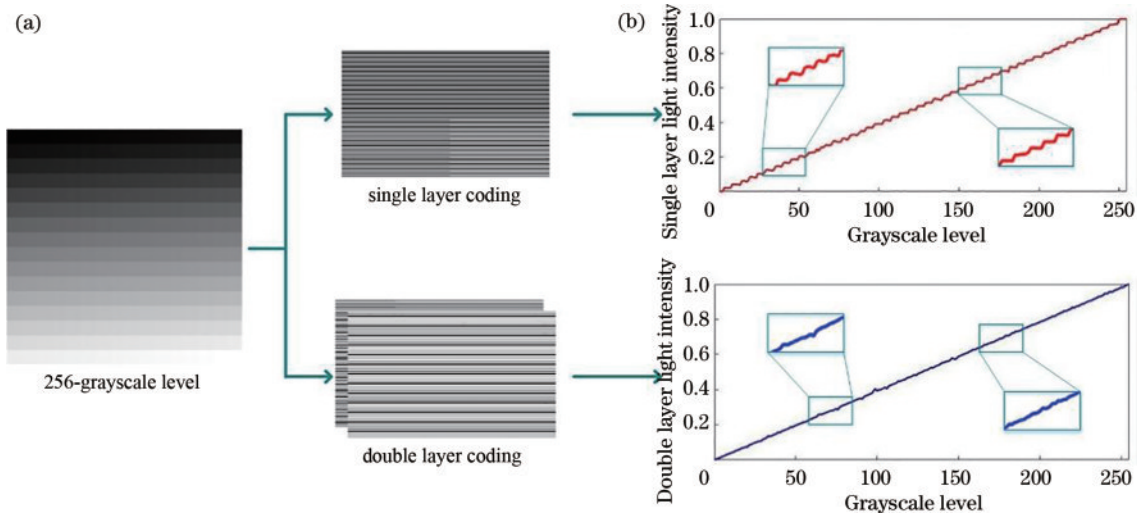


图 5 光强对比实验和结果。(a)光强测量的实验过程;(b)两种编码方式的光强分布

Fig. 5 Experiments and results of light intensity comparison. (a) Experimental process of light intensity measurement; (b) light intensity distribution of two encoding methods

3 分析与讨论

图 6 展示了在使用双层半色调图像联合编码的光场显示系统下,从不同角度拍摄得到的显示场景。这些场景是从观看视区的左 50°、左 25°、中间 0°、右 25°、右 50°的视角被相机采集到的。如表 1 所示,光场显示系统的双层菲林片采用了 4000 dpi 的打印精度。系统采用的具有 1.05 mm 截距的柱透镜在 100°的观看范围内构建 165 个视点。显示结果表明,在 100°的视角下,可以清晰地观察到连续视差、自然立体的三维图像,而

表 1 双层半色调图像联合编码光场显示系统的参数
Table 1 Parameters of light-field display system for joint encoding of double-layer halftone images

dpi	Lens pitch p / mm	Viewing angle / (°)	Number of viewpoints
4000	1.05	100	165

且图像中的细节和不同部位的位置关系都得到了准确的呈现。光场显示系统实现了大视角、超多视点的三维光场显示效果。

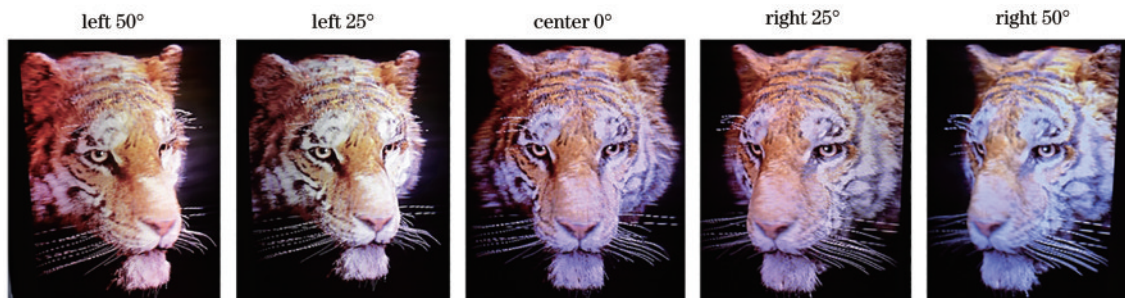


图 6 不同角度下光场显示系统的显示效果

Fig. 6 Display effect of light-field display system from different perspectives

图 7 展示了两种不同编码方法展现的具有相同 3D 内容的再现图像。从图 7(a) 可以看到, 因为使用单层半色调图像编码的 3D 图像, 只有 $56 \times 56 \times 56$ 的三色灰阶, 显示的颜色不够丰富, 在颜色变化剧烈的区

域, 图像细节部分是模糊的。相比之下, 双层半色调图像联合编码算法处理后的图像具有 $256 \times 256 \times 256$ 的三色灰阶, 质量上得到了提升, 动物头像的细节部分色彩更加丰富, 细节更加清晰, 如图 7(b) 所示。

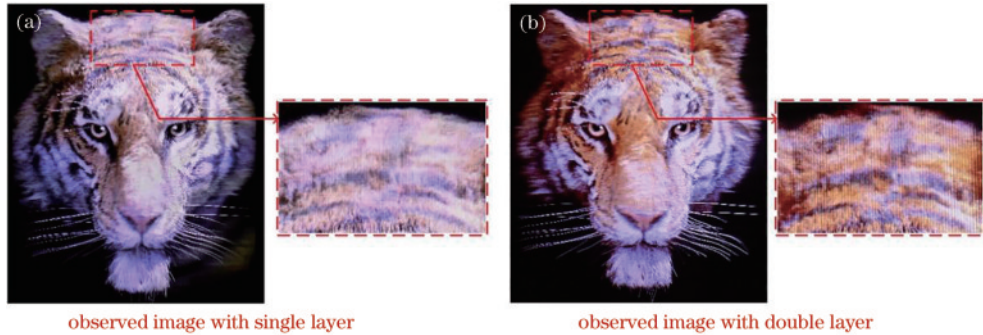


图 7 显示效果对比。(a) 单层半色调图像编码再现的三维图像; (b) 双层半色调图像联合编码再现的三维图像

Fig. 7 Comparison of display effect. (a) Reproduced 3D image with single-layer halftone images coding; (b) reproduced 3D image with double-layer halftone images joint coding

4 结 论

提出了一种基于双层半色调图像联合编码的超多视点、高灰阶光场显示系统。使用双层菲林片结构进行光场编码, 提升系统视点数目, 并设计了一种双层半色调图像联合编码算法以控制像素的灰阶等级。通过对光束进行两次强度调制, 有效扩展了像素所能显示的灰阶范围。实验结果表明, 在 4000 dpi 的打印精度下, 通过使用双层半色调图像联合编码, 光场显示系统在 100° 的观看范围内实现了 165 个视点。算法编码得到的灰阶等级具有不同的光线强度, 系统的灰阶等级-光线强度曲线由阶梯型分布变为正比型分布, 优化后的图像具有 $256 \times 256 \times 256$ 的三色灰阶。最终, 三维图像满足了光场显示系统超多视点、高灰阶、彩色的显示要求, 提高了系统的显示质量。

参 考 文 献

- [1] Evangelidis K, Papadopoulos T, Papatheodorou K, et al. 3D geospatial visualizations: animation and motion effects on spatial objects[J]. Computers and Geosciences, 2018, 111: 200-212.
- [2] Blanche P A. Holography, and the future of 3D display [J]. Light: Advanced Manufacturing, 2021, 2(4): 446-459.
- [3] Martinez-Corral M, Javidi B. Fundamentals of 3D imaging and displays: a tutorial on integral imaging, light-field, and plenoptic systems[J]. Advances in Optics and Photonics, 2018, 10(3): 512.
- [4] Ma Q G, Cao L C, He Z H, et al. Progress of three-dimensional light-field display[J]. Chinese Optics Letters, 2019, 17(11): 111001.
- [5] 董昊翔, 于迅博, 金秋, 等. 一种基于视点分段式体像素的具有 100° 正面观看视角的桌面式光场显示系统[J]. 中国激光, 2022, 49(4): 0409001.
Dong H X, Yu X B, Jin Q, et al. Tabletop 3D light-field display with 100° frontal viewing angle based on view-segmented voxels[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(4): 0409001.
- [6] Yao C, Cheng D W, Yang T, et al. Design of an optical see-through light-field near-eye display using a discrete lenslet array[J]. Optics Express, 2018, 26(14): 18292-18301.
- [7] Huang H K, Hua H. Systematic characterization and optimization of 3D light field displays[J]. Optics Express, 2017, 25(16): 18508-18525.
- [8] Liu B Y, Sang X Z, Yu X B, et al. Time-multiplexed light field display with 120-degree wide viewing angle[J]. Optics Express, 2019, 27(24): 35728-35739.
- [9] Wetzstein G, Lanman D, Hirsch M, et al. Compressive light field displays[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2012, 32(5): 6-11.
- [10] Wen J, Jiang X Y, Yan X P, et al. Dual-mode light field display with enhanced viewing range: from far distance viewable to near distance touchable[J]. Optik, 2022, 252: 168403.
- [11] Yu X B, Zhang Z H, Liu B Y, et al. True-color light-field display system with large depth-of-field based on joint modulation for size and arrangement of halftone dots [J]. Optics Express, 2023, 31(12): 20505-20517.
- [12] Yu X B, Li H Y, Sang X Z, et al. Aberration correction based on a pre-correction convolutional neural network for light-field displays[J]. Optics Express, 2021, 29(7): 11009-11020.
- [13] Yu X B, Li H Y, Su X W, et al. Image edge smoothing method for light-field displays based on joint design of optical structure and elemental images[J]. Optics Express, 2023, 31(11): 18017-18025.
- [14] Yu X B, Dong H X, Gao X, et al. 360-degree directional micro prism array for tabletop flat-panel light field displays[J]. Optics Express, 2023, 31(20): 32273-32286.
- [15] Kim C, Zimmer H, Pritch Y, et al. Scene reconstruction

- from high spatio-angular resolution light fields[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2013, 32(4): 73.
- [16] Li X L, Wang Y Q. Autostereoscopic display with bicylindrical lens based on temporal-spatial multiplexing [J]. *Chinese Optics Letters*, 2022, 20(3): 033301.
- [17] Nam D, Lee J H, Cho Y H, et al. Flat panel light-field 3-D display: concept, design, rendering, and calibration [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2017, 105(5): 876-891.
- [18] Yang L, Sang X Z, Yu X B, et al. Viewing-angle and viewing-resolution enhanced integral imaging based on time-multiplexed lens stitching[J]. *Optics Express*, 2019, 27(11): 15679-15692.
- [19] Ting C H, Chang Y C, Chen C H, et al. Multi-user 3D film on a time-multiplexed side-emission backlight system [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(28): 7922-7928.
- [20] Yu X B, Sang X Z, Gao X, et al. Large viewing angle three-dimensional display with smooth motion parallax and accurate depth cues[J]. *Optics Express*, 2015, 23(20): 25950-25958.
- [21] Cem A, Hedili M K, Ulusoy E, et al. Foveated near-eye display using computational holography[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10: 14905.
- [22] Li D H, Kiyotomo T, Horiuchi T, et al. Texture-aware error diffusion algorithm for multi-level digital halftoning [J]. *Journal of Imaging Science and Technology*, 2020, 64(5): 050410.
- [23] Lee J H, Kim D H, Yang J W, et al. Correlation between the compensation time and the current deviation of organic LED pixel circuit[J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2020, 28(11): 882-891.
- [24] Chen D, Sang X Z, Yu X B, et al. Improved halftoning method for autostereoscopic display based on float grid-division multiplexing[J]. *Optics Express*, 2016, 24(16): 18114-18125.